



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Desarrollo de herramientas de fabricación digital para el análisis de estructuras simples en régimen elástico y plástico

Treball realitzat per:

Álvaro Toledo Ávila

Dirigit per:

Rolando Chacón Flores

Grau en:

Enginyeria Civil

Barcelona, 18 de setembre de 2016

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

TREBALL FINAL DE GRAU

Índice

1. Introducción.....	2
1.1. Objetivos	2
1.2. Metodología	2
1.3. Resumen.....	3
2. Estado del arte.....	5
2.1. Structural Health Monitoring	5
2.2. Sensores	8
2.3. Implementación de sistemas de SHM	10
2.4. Sistema de adquisición de datos	12
2.5. Ejemplo real de SHM	13
2.6. Análisis en tiempo real	15
2.7. Fabricación Digital	22
2.8. Fabricación Digital aplicada a la Ingeniería Civil	28
3. Teoría del análisis de estructuras	31
3.1. Teoría elástica	31
3.2. Teoría plástica	36
4. Descripción del artefacto	39
4.1. Medición de magnitudes y electrónica.....	44
4.1.1. Dispositivos empleados	46
4.1.2. Programa de Arduino	52
4.2. Interfaz de usuario: cómo funciona la herramienta	56
4.2.1. Herramienta desarrollada	56
4.2.1.1. Análisis elástico	58
4.2.1.2. Análisis plástico	65
4.2.2. Código del programa en Processing	69
5. Futuras mejoras.....	74
6. Potencial educativo, de investigación y aplicación en la ingeniería civil	78
7. Conclusiones	83
8. Referencias	86
9. Anejos.....	90
9.1. Vigas	90
9.2. Pórticos	95

1. Introducción

1.1. Objetivos

En este trabajo se pretende abordar un concepto perteneciente a la Ingeniería Civil pero desde un punto de vista alternativo. Concretamente, el área de la que se parte es una rama del estudio de infraestructuras basada en el control y seguimiento de parámetros estructurales de estas, con el fin último de evaluar su integridad. Como se verá en los siguientes apartados del presente documento, esta área es conocida como Monitorización de la Salud Estructural, y pese a ser una línea de investigación y trabajo bastante joven, hoy en día goza de mucha relevancia dentro de numerosos proyectos constructivos debido a todos los beneficios que aporta en muchas de sus distintas fases. Su importancia, sin entrar en más detalle por el momento, reside en que la monitorización enfocada a evaluar el estado de una construcción permite detectar anomalías, daños y disfunciones de forma prematura, lo que implica que las medidas a tomar serán también prematuras y, sobretodo, más efectivas.

El objetivo principal que se persigue en este proyecto es la implantación de un sistema de monitorización que sea capaz de obtener información de una estructura haciendo uso de tecnología accesible y asequible por cualquier usuario particular, mostrando al final unos resultados que sean atractivos y con sentido ingenieril. De esta forma, se pretende demostrar que es posible mezclar el concepto de Monitorización de la Salud Estructural, uno de los dos pilares de este trabajo, con otro concepto que también aparecerá más adelante y que se denomina Fabricación Digital, el segundo pilar. Sin querer profundizar todavía en ningún tema, la Fabricación Digital es la idea de resolver problemas y necesidades mediante toda la tecnología que se tenga al alcance, pudiendo destacar por encima de otras cosas el uso de la informática, muy potente actualmente, y la gran variedad de dispositivos electrónicos que se pueden encontrar en cualquier tienda especializada por precios impensables hasta hace pocos años. Además, esta idea se ha ido haciendo grande y popular cada vez entre más desarrolladores independientes gracias a su filosofía basada en compartir todo el conocimiento, donde aparecen otros conceptos quizá más conocidos como el *software* o el *hardware* libres. Al final, se quiere culminar con la elaboración de una herramienta basada en la Fabricación Digital enfocada al análisis de estructuras simples, en régimen elástico y plástico, la cual ha sido creada desde cero escribiendo unos códigos propios y empleando una red de dispositivos electrónicos diseñada especialmente también propia.

1.2. Metodología

Para poder llegar al objetivo marcado, ha sido necesario tomar una serie de decisiones antes de seguir avanzando. Primeramente, se creyó oportuno fabricar un modelo a escala de una estructura sobre el cual implantar el sistema de monitorización deseado. Dicho modelo o prototipo permite analizar el comportamiento de los dispositivos empleados sin salir del laboratorio, a la vez que también evita la necesidad de hacer uso de la tecnología más avanzada, pudiéndose así utilizar sensores de gama baja o media, por ejemplo, que a pequeña escala cumplen su función perfectamente. El siguiente paso consiste en decidir qué estructura

fabricar, por lo que buscando formas que fueran simples pero a la vez muy comunes se optó por crear una viga y un pórtico.

Una vez ya se conoce como va a ser la estructura a la que nos vamos a enfrentar, hay que pensar en el propio sistema de monitorización. Este sistema constará principalmente de tres elementos: los sensores, el dispositivo de adquisición de datos y el ordenador de procesamiento. Por su parte los sensores son los encargados de captar las magnitudes físicas de interés, por lo que será necesario crear una red adecuada a los posibles casos de estudio. Por otro lado, la forma de registrar dichas magnitudes es lo que verdaderamente empieza a aportar novedades, ya que todo el sistema de captación girará en torno a un dispositivo muy concreto: la placa programable de la compañía Arduino, que será nuestro particular dispositivo de adquisición. El tercer elemento tiene la finalidad de procesar los datos obtenidos, y como se podrá ver, la meta es visualizar por pantalla diferentes valores y esquemas que representen la situación de la estructura analizada: reacciones, momentos flectores, cortantes, tensiones o deformadas, todo ello de forma simple y atractiva. Para lograrlo, se ha desarrollado una aplicación con menús interactivos enfocados a futuros usuarios y capaz de incorporar la información captada del mundo físico. En este caso se ha optado por emplear el programa Processing, un *software* libre y gratuito basado en Java capaz de realizar los cálculos requeridos, aplicarlos a las fórmulas adecuadas previamente introducidas y dibujar lo que hayamos planeado en respuesta a los resultados. Cabe decir que la herramienta desarrollada ha sido creada específicamente para este proyecto y nace de un código totalmente propio.

Por todo lo expuesto, este trabajo se puede incluir dentro de la categoría de investigación y desarrollo, puesto que aborda temas relacionados directamente con la ingeniería civil pero pretende estudiar conceptos que resultan novedosos en ese campo. Además, no sólo se busca asimilar aspectos de vanguardia, sino que estos también se quieren afrontar desde puntos de vista distintos a los empleados habitualmente.

1.3. Resumen

En conclusión, el objetivo principal se pretende alcanzar a base de completar una serie de módulos individuales, los cuales al unirse forman un sistema completo. Estos módulos, que ya se han visto, empiezan con la concepción de la idea y toma de decisiones y prosiguen con la fabricación del modelo, la definición de la red de sensores, el programado de la placa Arduino y la elaboración de una aplicación para el análisis de estructuras.

En cuanto a la estructura del documento que se presenta, el primer apartado que se encuentra tras esta introducción consiste en una explicación de los conocimientos existentes y del estado del arte que rodean a los conceptos de Monitorización de la Salud Estructural y de Fabricación Digital. En él se presentan de forma más exhaustiva ambos conceptos, se muestran ejemplos reales de aplicación, se explican los procesos que se siguen y se analizan temas estrechamente relacionados como los sensores, los sistemas de adquisición de datos y el análisis en tiempo real. Seguidamente, aparece un apartado donde se pretende exponer la teoría que sustenta todas las fórmulas y cálculos empleados en el proyecto. Dicho apartado se basa en la teoría elástica de vigas de Euler-Bernoulli, mostrando su concepción y desarrollo, pero también se adentra de forma muy breve en cálculos plásticos, los necesarios para

entender las fórmulas que se usan cuando la aplicación se enfrenta a ese régimen. El tema que trata la siguiente sección del documento se centra en explicar el artefacto fabricado. Partiendo de una descripción más básica del objeto en sí, de las partes que lo conforman y de la utilidad de estas, en este capítulo también se realiza una explicación más exhaustiva de otros conceptos de gran importancia como son la medición de magnitudes, la electrónica empleada y la interfaz de usuario desarrollada. Se puede decir que este apartado sintetiza el grueso del trabajo realizado y a través de él se justifican muchas de las decisiones tomadas. Los dos siguientes capítulos, previos a las conclusiones, tienen una visión a largo plazo, ya que aportan ideas que continúan en la misma línea del sistema creado pero sugieren incluir, en un futuro, novedades y aplicaciones distintas pero plausibles. Así pues, uno de estos apartados se centra en aportar posibles mejoras para el mismo prototipo de este proyecto, potenciando funciones ya existentes o añadiendo nuevas. Por su lado, el otro apartado propone otros proyectos que, mezclando de nuevo la Monitorización de la Salud Estructural y la Fabricación Digital, podrían tener cabida dentro de la ingeniería civil o al menos podrían ser objeto de estudio y validación en un futuro.

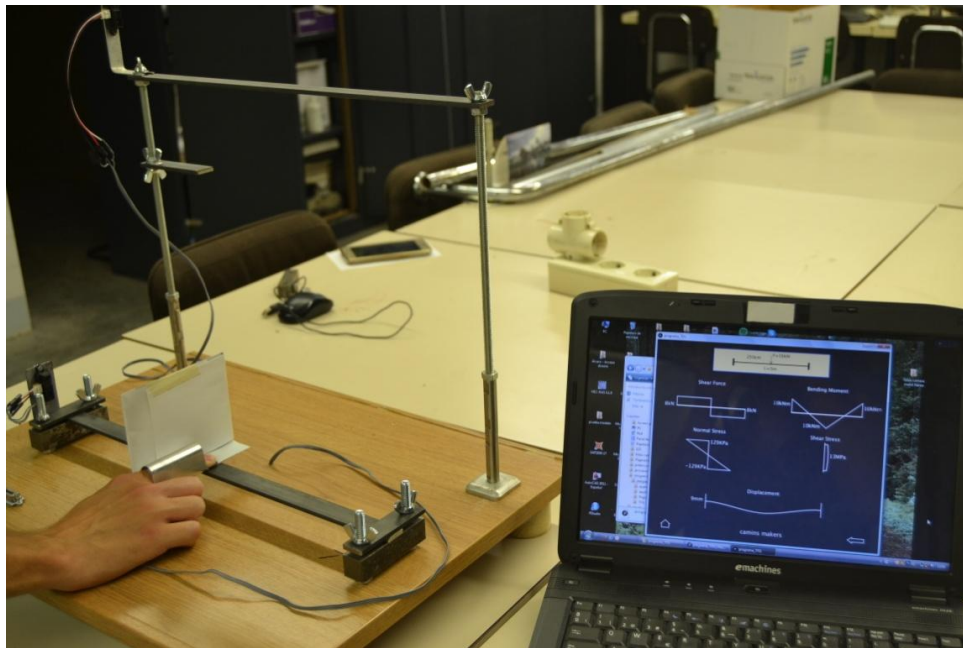


Fig. 1 Artefacto y herramienta desarrollados en funcionamiento

2. Estado del arte

Durante muchos años se ha asociado la ingeniería civil únicamente a la construcción de infraestructuras, centrándose todos los estudios y avances realizados básicamente en los conceptos más clásicos de resistencia de materiales, estabilidad y funcionalidad de las estructuras. Sin embargo, el hecho de que esta ingeniería dé lugar a infraestructuras que son el germen del desarrollo social, con una vida útil esperada por lo general larga, rigidizando mucho el territorio y siempre bajo grandes inversiones económicas ha forzado a dar un paso más allá. Este avance se refleja en la ampliación del alcance de la ingeniería civil, un campo que se ha visto obligado a asimilar las nuevas tecnologías y a implementarlas en cada una de sus distintas fases.

Con el objetivo de evitar todas las consecuencias negativas que conlleva el deterioro de una infraestructura, ya sea durante su construcción o a lo largo de su vida útil, la obra civil ha empezado a utilizar estrategias que persiguen la detección y análisis de los daños que puedan llegar a surgir. Siguiendo esta finalidad, para poder actuar frente a la aparición de daños ha nacido el concepto de monitorización de la salud estructural, más conocido por sus siglas en inglés SHM (Structural Health Monitoring). Esta idea ha creado un nuevo campo dentro de la ingeniería y ha ido creciendo gracias al desarrollo de tecnologías como los sensores. Además, el SHM ha permitido que el análisis estructural salga de la fase de proyecto y pase a formar parte de toda la vida de una estructura, llegando a surgir incluso la idea del análisis a tiempo real.

Por otra parte, el gran avance de la tecnología y sobretodo la ampliada comprensión de conocimientos informáticos y electrónicos entre la población han permitido la aparición de un concepto revolucionario conocido como Fabricación Digital. Dicho concepto no está relacionado únicamente con la ingeniería civil, sino que puede aplicarse a cualquier campo, ya que consiste en dar soluciones a cualquier tipo de situación mediante el empleo de tecnología y dispositivos electrónicos cercanos a cualquier usuario. De esta forma, la principal importancia de la Fabricación digital reside en igualar el nivel del fabricante con el del usuario, consiguiendo así una mejor respuesta a las necesidades que puedan surgir.

En los siguientes sub-apartados se tratará de explicar con más detalle el conocimiento actual de los diferentes aspectos que rodean el SHM, así como el mismo concepto de monitorización estructural, y las ideas más relevantes de la Fabricación Digital. Antes de nada hay que destacar que para introducir y empezar a profundizar en las ideas clave del SHM, este capítulo se ha inspirado y ha cogido explicaciones de dos revisiones de los estudios y literatura existente desarrollados por Sohn et al. [1] y Quintero y Villamizar [2], y del libro de Abdel-Basset [3] en el que también se revisan todos los conocimientos existentes en este campo.

2.1. Structural Health Monitoring

Para empezar, si se quiere entender cómo nació esta rama de la ingeniería hay que tener en mente que las estructuras civiles están sometidas a solicitaciones de servicio

constantes, lo que genera un daño progresivo en ellas que no puede ser obviado de ninguna de las maneras. Además, a este daño se le deben añadir otros posibles defectos causados por negligencias humanas, por errores durante la construcción o por desastres naturales, ya sea una gran avenida torrencial o un terremoto. Hay que destacar que estos últimos no sólo repercuten negativamente en la estructura sino que lo hacen de forma repentina.

Sabiendo todo esto, los responsables de las estructuras han sentido la necesidad de detectar el daño, que es inevitable, con el tiempo suficiente como para mantener un mínimo grado de seguridad. Para ello, y desde un principio, se ha pensado en el uso de métodos de evaluación que permitan conocer la salud de la construcción pero sin alterarla, es decir, de técnicas no destructivas.

Los primeros métodos empleados fueron, obviamente, las inspecciones visuales. Dichas inspecciones permiten descubrir daños localizados y que tienen lugar cerca de la superficie, con lo que la caracterización del daño se ve muy restringida. De todas formas, unos primeros avances aparecieron tras las inspecciones visuales, ya que al conocer el lugar donde la estructura no es como se desea, fue posible aplicar técnicas modernas como los métodos acústicos y ultrasónicos que, pese a centrarse en zonas muy concretas, ya aportaban más información a los responsables.

La industria de la construcción se ha beneficiado y lo sigue haciendo de las técnicas más simples para detectar disfunciones estructurales, pero con el avance de la ingeniería, el empleo de nuevos materiales y la relevancia incipiente de aspectos que anteriormente no se tenían en cuenta, como pueden ser la seguridad o los posibles efectos que el fallo de una infraestructura puede tener en todo el sistema, la detección del daño no podía basarse únicamente en aquel que se encontrase cerca de la superficie visible de los materiales. Por ello, a partir del año 1940 aproximadamente, se empezaron a controlar propiedades de los materiales sin saber previamente si estos presentaban alguna anomalía. Los controles se han llevado a cabo tanto en obra, por ejemplo para determinar si el hormigón ha alcanzado la resistencia óptima antes de desencofrar, como a lo largo de la vida útil de las estructuras. Muchos métodos de los empleados para caracterizar propiedades durante el período de servicio de una estructura ya existían, pero fue más o menos a partir de los años 70 cuando su implementación fue estudiada de forma más exhaustiva y empezaron a ser usados activamente en la obra civil. Algunos de estos métodos de detección del daño que se utilizaban inicialmente son los ultrasónicos y las emisiones acústicas, ambos ya expuestos, los rayos X, otros métodos basados en campos electromagnéticos e imágenes térmicas, entre muchos otros.

Todas las técnicas expuestas en el apartado anterior, así como la capacidad de los operarios de intuir donde encontrar daños potenciales, no son para nada infalibles. Además, hasta ahora se ha estado analizando únicamente el daño local, es decir, aquel que sufre un elemento concreto de la estructura y, en la mayoría de casos, en un punto concreto, lo que hace sospechar que no sea posible conocer el estado del resto de la estructura con un simple ensayo. Si además se añade que los materiales son cada vez más complejos y más difíciles de caracterizar, como es el caso del hormigón armado, y que las estructuras también aumentan su complejidad con nuevas formas y empleando materiales distintos, se entiende que la

técnica haya evolucionado hacia métodos que permitan caracterizar la salud de las estructuras globalmente, es decir, que analicen todo el conjunto y no propiedades aisladas.

Así pues, de la necesidad de conocer la salud de una estructura en su totalidad, desde finales del siglo XX han ido naciendo varios métodos que persiguen la detección global del daño. De todos los métodos desarrollados hay que destacar, debido a su amplio conocimiento y utilización, uno centrado en la vibración de las estructuras. Dicho método, conocido como monitorización de la salud estructural basada en las vibraciones, utiliza el hecho de que algunas características esenciales de las estructuras, como son la masa, la rigidez o el amortiguamiento, pueden ser controladas mediante el estudio de los cambios en su vibración. Sin entrar en muchos detalles, el método parte de la ecuación del movimiento de una estructura sin daños y sin fuerzas externas aplicadas a partir de la cual, operando adecuadamente, se pueden llegar a relacionar los valores y los vectores propios característicos de la ecuación de la estructura dada con su rigidez. Además, se pueden entender los valores propios como las frecuencias naturales de la estructura, es decir, las frecuencias a las que vibra cuando se ve excitada por fuerzas externas, y los vectores propios como las formas modales, las formas que adquiere la estructura para cada frecuencia natural, y si estas cambian estarán indicando que algún daño ha aparecido y ha hecho que la rigidez global disminuya.

Gracias al método anterior es posible detectar la aparición de alguna anomalía de forma eficiente, pero al tratarse de un daño global, la actuación a tomar para resolver el problema resulta difícil de decidir debido a que no se conoce dónde se encuentra exactamente dicho daño. Por esta razón, se han desarrollado otros métodos basados en características derivadas de las formas modales, como pueden ser la pendiente o la curvatura, que sí permiten asignar el daño surgido a una zona concreta de la estructura. De esta forma, se pasa de estudiar una respuesta dinámica como es la vibración a estudiar respuestas estáticas. Estos métodos más modernos emplean ecuaciones del análisis de estructuras para relacionar la curvatura, o segunda derivada del desplazamiento, con el momento flector y con la rigidez de la estructura. De esta forma, si se detecta un cambio en la curvatura del desplazamiento en algún punto del elemento de estudio esto estará indicando una alteración en la rigidez, es decir, la aparición de algún daño en ese punto concreto de la estructura.

El estudio global del daño estructural, ya sea para detectar la aparición de este o para darle una localización en la geometría del elemento, ha hecho que los riesgos derivados de un accidente por el fallo de una estructura se hayan visto considerablemente reducidos. Para seguir avanzando en este campo, actualmente también se emplean métodos basados en modelos numéricos, los que a pesar de requerir una tecnología y un *software* más avanzados permiten estudiar aún con más detalle la aparición de problemas.

Las técnicas y métodos que han ido apareciendo a lo largo de los años haciendo crecer el SHM se pueden agrupar, siguiendo el criterio de Rytter [4], en cuatro categorías. Según va aumentando la cantidad de datos adquiridos de una estructura, y en consecuencia el grado de complejidad de los métodos de detección, se pasa de una primera categoría en la cual únicamente se busca determinar la aparición de algún daño estructural a una segunda en la que se busca conocer donde se encuentra esa anomalía dentro del elemento de estudio. La categoría más básica engloba todos los métodos más simples de detección local y los que

estudian las vibraciones globales, mientras que la segunda hace referencia a los métodos que trabajan explotando características derivadas de las formas modales. La tercera categoría añade una cuantificación del daño estructural, para lo que es necesario el uso de modelos numéricos, y si además se realiza una estimación de la vida útil restante ya entramos en la cuarta y última categoría. Esta categoría final emplea estudios muy detallados de los materiales, de las uniones y de las solicitaciones que la estructura deberá seguir soportando en el futuro.

A todos los métodos expuestos, desde los más simples y que requieren de la experiencia de un operario hasta los más complejos y que dependen de la tecnología más moderna, se les debe añadir la evolución de los dispositivos de captación de las magnitudes físicas de interés. Gracias a la mejora en estos aparatos, actualmente es posible tener monitorizadas magnitudes que antaño eran imposibles de conocer, con lo que se descartaba el estudio de la salud estructural a través de ellas, o también es posible conocer con mucha más precisión otras magnitudes requeridas. Además, puede darse el caso de que el avance de la tecnología llegue a saturar de información a los ingenieros encargados de analizarla, ya que los dispositivos de captación actuales permiten obtener una gran cantidad de datos en un periodo corto de tiempo. Para solucionar este contratiempo el SHM está empezando a incluir en sus estudios el análisis estadístico como un recurso adicional.

2.2. Sensores

Cuando se habla de sensores se hace referencia a dispositivos que permiten captar magnitudes físicas relacionadas, en este caso, con el ámbito de alguna estructura. Lo que interesa medir es la respuesta de dicha estructura a acciones ambientales, como podrían ser el viento, la temperatura o el tráfico regular sobre un puente, o a acciones forzadas, como por ejemplo el paso de camiones con unos pesos determinados de nuevo sobre un puente, así como también es interesante conocer las intensidades con que todas estas acciones inciden sobre la estructura. Con este fin, se han ido desarrollando y adaptando distintos mecanismos de captación utilizando sobretodo tecnología proveniente de la ingeniería electrónica. A continuación se presentan distintos sensores que pueden ser utilizados en SHM.

Por un lado existen sensores que permiten obtener las magnitudes que no están únicamente relacionadas con las estructuras. En este conjunto se encuentran los sensores de temperatura, que aprovechan el hecho de que según como esta varíe también cambia la resistencia eléctrica de materiales conductores o semiconductores. Actualmente se puede llegar a una precisión de medio grado centígrado, trabajando en rangos amplios desde los -20°C hasta los 80°C . Incluidos en este grupo están también los anemómetros y anemoscopios, que permiten medir la velocidad y dirección del viento. Estos sensores pueden utilizar desde un sistema simple, basado en la medición de la velocidad a la que gira un elemento sometido al viento, hasta sistemas más modernos que utilizan tecnología láser y ultrasónica. Otros sensores menos comunes, aunque en alguna ocasión y para alguna infraestructura determinada pueden ser útiles, son los medidores de humedad y de presión atmosférica.

Por otro lado están los sensores que miden magnitudes relacionadas con la estabilidad de la estructura. Para comenzar se puede hablar de los medidores de tensión, unos sensores

que se acoplan al elemento que se quiere monitorizar y que permiten conocer la tensión que se está soportando, ya sea a compresión o a tracción. Históricamente se han utilizado dos tipos de tecnologías distintas para el mismo fin: las galgas extensiométricas y los transductores piezoeléctricos. Las primeras trabajan de manera similar a los sensores térmicos, ya que aprovechan la variación de la resistencia de un conductor, pero en este caso cuando es sometido a una tensión y su geometría cambia, de modo que interesa utilizar un material que no sufra grandes cambios de resistencia eléctrica en función de la temperatura (una aleación de cobre y níquel llamada constantán cumple este requisito). Estos sensores son elementos prácticamente planos que se adhieren a la estructura de estudio y que se pueden usar de forma lineal para medir la tensión cuando ya se conoce la dirección principal, por ejemplo la tracción en cables, o en planos con el objetivo de medir no sólo la magnitud de la tensión sino también la dirección principal de ésta, por ejemplo en el tablero de un puente. Por su parte, los transductores piezoeléctricos, como su propio nombre indica, miden la tensión gracias a materiales que generan una carga eléctrica cuando son deformados. Típicamente se emplean cristales, como el cuarzo, o materiales cerámicos y, además, tienen la ventaja de no necesitar alimentación eléctrica para funcionar. Dependiendo de cómo se dispongan los elementos de medida se pueden crear distintas células de carga y se tendrán sensores más adecuados para medir compresión o para obtener tracción, pero con esta misma tecnología también es posible y muy común caracterizar la flexión, el corte o la presión sobre una superficie. Actualmente existen sensores que pueden trabajar con fuerzas del orden de meganewtons.

Con el fin de medir el desplazamiento y la velocidad angulares, magnitudes que pueden ser relacionadas con el daño estructural, también es utilizado el giroscopio, un dispositivo que se basa en la segunda ley de Newton para relacionar la variación de momento angular con un par de fuerzas aplicado. Para evaluar la salud de una estructura también hay que fijarse en la aceleración y la deformación que en ella tienen lugar. La primera magnitud se obtiene por medio de acelerómetros, cuyos modelos pueden ir desde uno muy simple que funciona con una masa conocida unida a un dinamómetro hasta modelos que utilizan el fenómeno piezoeléctrico ya explicado, existiendo otras variantes con sus ventajas y desventajas. Para medir desplazamientos y deformaciones se deben utilizar receptores GPS en puntos estratégicos de las estructuras, un sistema que hoy en día puede llegar a una precisión de milímetros.

Para permitir tomar mediciones en superficies complicadas, así como en ambientes con altas temperaturas, a partir de 1980 aproximadamente se comenzó a investigar en el uso del láser como herramienta de captación de magnitudes. Un primer uso directo del láser es la medición de oscilaciones con un instrumento llamado vibrómetro láser Doppler. Este aparato, como muestra TYP Mediciones es su web [5], funciona lanzando un haz láser hacia el objeto que se pretende medir, de modo que si éste está en movimiento, siguiendo el efecto Doppler, se reflejará una onda con otra frecuencia. La luz recibida se puede analizar y relacionarla con la velocidad de vibración de la estructura y, en consecuencia, se pueden conocer aceleraciones y desplazamientos. Gracias a la tecnología empleada, y a diferencia de algunos sensores ya explicados y que requieren una instalación que afecta a la estructura, el vibrómetro láser se trata de un sistema no invasivo. Además, permite captar un abanico de frecuencias mucho más amplio que los acelerómetros clásicos, sobre todo a partir del comienzo de siglo cuando se han intensificado los estudios tanto en frecuencias muy pequeñas como en frecuencias muy altas.

Por último, la adaptación de la tecnología de la fibra óptica a los sensores ha permitido mejorar algunos de los sistemas previamente expuestos. La fibra óptica no es más que un conjunto de finos filamentos de vidrio, habitualmente, que son capaces de dirigir luz por su interior y que según las condiciones en las que se encuentren cambiarán su capacidad de propagación. De esta forma, se pueden medir la variación de luz propagada y extraer conclusiones relacionadas con otras magnitudes físicas interesantes de la estructura que se quiere caracterizar. La fibra óptica se puede usar para crear sensores de temperatura y acelerómetros, pero en la ingeniería civil es más común su uso como sensor de tensión debido a las ventajas que aporta respecto a los sensores eléctricos antes explicados. Entre estas ventajas se pueden destacar su baja vulnerabilidad a interferencias electromagnéticas, por ejemplo en condiciones de tormentas, su mejorada tolerancia a temperaturas extremas, una gran resistencia a la corrosión y un tamaño más reducido, cuando se quiere usar en grandes estructuras, que permite instalar estos sensores si alteraciones importantes. Hay que destacar que para mejorar la durabilidad es necesario usar la fibra óptica insertada en tubos protectores, lo que permite tomar mediciones en ambientes más hostiles y en monitorizaciones a largo plazo.

Para acabar, se debe tener en cuenta que la tecnología de todos estos sensores sigue avanzando día a día, incluso en términos económicos. Este hecho hará que con el paso del tiempo la implantación de sistemas de sensores sea cada vez más eficiente y accesibles a proyectos con presupuestos menores.

2.3. Implementación de sistemas de SHM

Actualmente, al hablar de monitorización de la salud estructural se hace referencia a un sistema de sensores, más o menos complejo, que capta la información pertinente y que la transmite a un centro de procesamiento donde será analizada. Según Abdel-Basset [3], con la instalación de dicho sistema se pueden perseguir distintos objetivos dentro de una misma estructura y a lo largo de su vida útil. Para este autor, se puede emplear un sistema de SHM para realizar el control de calidad durante la construcción, como sistema de alarma durante el período de servicio o como evaluación del estado de servicio o del estado límite último. Hay que destacar que cualquiera de estas opciones tiene como objetivo último poder reaccionar a tiempo ante algún desperfecto, incrementando de esta manera la vida útil de las estructuras.

De todos modos, y como se afirma en el artículo de Sohn et al. [1], antes de diseñar un sistema enfocado al SHM hay que hacerse cuatro cuestiones esenciales. La primera y más importante consiste en preguntarse si existen motivos de peso para llevar a cabo la monitorización, ya sean económicos, técnicos o humanos. Si la respuesta a este primer punto es negativa hay que descartar seguir gastando recursos en ese proyecto. Tras la primera cuestión, hay que plantearse primero cómo se define el daño en el caso de la estructura a estudiar, seguido de cuáles son las condiciones ambientales y de carga bajo las que esta opera y, para acabar, qué limitaciones se pueden presentar a la hora de obtener la información necesaria. La respuesta a estos cuatro puntos darán una primera idea de cuál es el sistema más adecuado para cada caso y permitirán pasar a los apartados más específicos que se presentan a continuación.

Antes de nada, hay que aclarar que las cuestiones que uno debe plantearse antes de implementar un sistema de monitorización de la salud estructural no son aplicables a los estudios en laboratorio, cuyo objetivo es investigar y donde las condiciones están mucho más controladas y las estructuras suelen ser mucho más simples que las reales. Por esta razón es posible encontrar una gran cantidad de ejemplos prácticos de sistemas de SHM realizados en laboratorio en comparación con los ejemplos aplicados a estructuras reales en condiciones de servicio, para los cuales sí se deben tener en cuenta las preguntas iniciales.

Si se sigue el criterio de Chang [6], la implementación de cualquier sistema de SHM se puede dividir en cuatro apartados, los cuales estudiados a fondo por separado, pero teniendo en cuenta que todos ellos están relacionados, permiten conseguir un sistema óptimo para cada caso. Empezando por la identificación y la caracterización del estado actual de la estructura, lo que permite conocer cuál es el punto de partida de la monitorización, el segundo apartado consiste en el posicionamiento adecuado de los sensores y en la toma correcta de mediciones. De este modo, si los dos primeros apartados se han desarrollado con el rigor suficiente permitirán que en el tercero se realice una detección del daño sufrido por la estructura, cuantificando y localizando cualquier anomalía. Por último, llegamos al cuarto apartado, que se centra en la toma de decisiones en respuesta a lo que se haya podido detectar y que representa la finalidad de todo el proceso.

Los dos primeros apartados que conforman el SHM, así como las cuatro cuestiones preliminares, son cruciales para poder definir los tipos de métodos a utilizar durante la monitorización y los sensores que darán forma al sistema. Hay que decantarse por unos tipos de sensores u otros según muchas variables, como pueden ser las magnitudes a medir, la disponibilidad, las condiciones climáticas que deben soportar los dispositivos, la vida útil esperada de estos, la precisión requerida o la inmediatez de respuesta deseada, entre muchas otras posibles. Una vez sabidos los sensores que se emplearán, hay que definir la red que definirá el sistema final y que llevará la información captada desde los sensores hasta el centro de procesamiento. Dicha red, como se verá más adelante, tiene también muchas posibilidades, empezando por la decisión de utilizar métodos con cables o inalámbricos, pero todas las configuraciones deben buscar la forma más eficiente en términos técnicos y económicos de hacer llegar los datos a un mismo punto, donde se podrá realizar el tercer punto relacionado con el análisis.

Es preciso destacar una variable más a tener en cuenta a la hora de desarrollar un sistema de este tipo: la frecuencia de la toma de datos. Según los años que una estructura lleve construida y según también la importancia socioeconómica de esta, es posible encontrar ejemplos en los que las monitorizaciones se realizan de forma aislada, con campañas cada cierto número de años, anualmente o semestralmente. Si se trata de estructuras muy antiguas, con riesgo de fallo elevado, de construcciones de gran importancia o de estructuras en la fase de construcción es más probable que la red de sensores esté instalada permanentemente, de manera que la frecuencia de las monitorizaciones puede ser más elevada o incluso continua.

2.4. Sistema de adquisición de datos

Merece la pena dedicar un apartado al conjunto formado por la red de sensores y el centro de procesamiento que se han mencionado anteriormente y que es conocido como sistema de adquisición de datos o *DAQ System* (por su nombre en inglés *Data Acquisition System*), del cual se ha extraído información de la web de National Instruments [7]. Dicho conjunto tiene la función principal de medir magnitudes físicas de interés y procesarlas, pero siempre buscando la máxima eficiencia, flexibilidad y la mejor relación calidad precio. Para lograr estos tres objetivos se hará uso de la avanzada tecnología informática existente, la cual permite tanto procesar grandes cantidades de datos como mostrar unos resultados de la forma más adecuada posible, y de las diversas formas de comunicación entre dispositivos que se han desarrollado.

Para empezar, los dos extremos del sistema son, como ya se ha dicho, los sensores y el ordenador. Los sensores captan la información necesaria, mientras que el ordenador se encarga de almacenar la información, procesarla y mostrar los resultados a los usuarios. Este ordenador debe incluir al menos dos tipos de programas: el *software* encargado de comunicarse con el resto del sistema y entender la información que llega, conocido como *driver*, y el *software* especialmente desarrollado para cada proyecto y cuya función es analizar y presentar la información captada de la forma deseada por los autores.

Sabiendo esto, también hay que exponer un tercer elemento del sistema que es el encargado de comunicar los dos extremos. Se trata de un dispositivo al que llega la información analógica, representativa de las magnitudes físicas captadas por los sensores, y donde se digitaliza para que al llegar al ordenador esta tenga sentido. Por tanto, estos dispositivos de adquisición de datos deben estar preparados para recibir una señal eléctrica de entrada desde los sensores, convertirla en información digital y emitir una señal de salida hasta el centro de procesamiento u ordenador. De esta forma, dicho dispositivo debe contar con puertos de entrada y con un puerto de salida, y es en estas conexiones donde aparece el concepto de flexibilidad, puesto que existen numerosas posibilidades. Para empezar, la comunicación más típica y común con el ordenador es el USB, ya que está estandarizado y la gran mayoría de fabricantes incluyen esta tecnología en sus ordenadores como modo de conexión con los elementos periféricos. Siguiendo con las conexiones mediante cables, si se requiere cubrir una distancia mayor que la necesaria en un laboratorio, por ejemplo, y sin perder parte de la información, por pequeña que sea esta pérdida, se suele recurrir a la conexión mediante Ethernet, con un funcionamiento a la hora de transmitir datos distinto al USB. Hay que destacar que, aunque no se van a explicar aquí, existen otras formas de comunicación mediante cables que de la misma manera que el USB y Ethernet harán llegar finalmente los datos al ordenador. Ahora bien, es muy probable que nos interese estudiar una estructura real desde un despacho, con lo que el ordenador usado in situ no será el destino final de la información, o directamente queramos que el dispositivo que hace de intermediario lo envíe todo hasta dicho despacho. Es probable también que algunos dispositivos deban comunicarse con otros, ya sean sensores o procesadores, y que el cableado no sea la manera más eficiente de hacerlo. En todos estos casos hay que pensar en sistemas de comunicación inalámbricos como el Bluetooth, la tecnología Wi-Fi, que permite crear redes más complejas

de elementos conectados, o el GPRS, que permite la comunicación entre elementos sirviéndose de la red de satélites.

El sistema de adquisición de datos que se emplee en cada proyecto será decisión de los ingenieros, que tras valorar las necesidades y la tecnología disponible acabarán diseñando aquel sistema más eficiente para los recursos con los que se cuente. De esta forma, según las prioridades de cada monitorización, se acabarán escogiendo entre métodos cableados o métodos inalámbricos, y entre las distintas alternativas dentro de estos.

Para acabar, y haciendo referencia al dispositivo que hace de intermediario en el sistema de adquisición, se puede decir que históricamente implicaba incluir prácticamente otro ordenador. En realidad se trata de un microcontrolador con la estructura adecuada para esta tarea, y con el tiempo han ido apareciendo productos más sencillos y baratos que permiten realizar la misma función. De todas formas, y a modo de avance, en el presente proyecto se trabaja con una placa Arduino, que se explicará más adelante, como elemento intermedio entre los sensores y el ordenador y que es un dispositivo muy barato teniendo en cuenta su importancia dentro de un sistema de monitorización completo.

2.5. Ejemplo real de SHM

A continuación se presenta un ejemplo de monitorización que ejemplifica bastante bien muchos de los conceptos relacionados con este ámbito y que permite acabar de entender muchos de ellos. En concreto, el proyecto a monitorizar se trata de un tramo de autopista en China que al pasar sobre el río Amarillo se quiere convertir en un puente sostenido con tirantes. Los investigadores Li et al. [8] han desarrollado un sistema para controlar el puente a largo plazo y poder determinar así su grado de seguridad pensando en solicitudes futuras, ya que esta infraestructura resulta clave en las comunicaciones internas de China y, además, se sabe que deberá soportar camiones con pesos superiores a los permitidos en las normas. La monitorización de esta estructura permite también planificar mejor las actividades de mantenimiento e inspección y estudiar más a fondo el comportamiento de esta clase de puentes.

El sistema de SHM empieza con un conjunto de sensores, instalados todos durante la construcción del puente iniciada en 2001, que han sido escogidos para captar las magnitudes físicas más características de la salud de esta estructura concreta. El daño local sufrido por el puente se mide empleando sensores de tensión de fibra óptica en varios puntos como el tablero, las torres o los cables, y en distintas direcciones. Uno de los primeros problemas surgió en la disyuntiva de querer monitorizar a largo plazo y usar esta clase de sensores con una durabilidad limitada, para lo que se tuvo que recurrir a soluciones estudiadas y validadas por otros ingenieros en las que se recubre estos dispositivos con polímeros reforzados con fibras. Por otro lado, para estudiar el daño global se emplean métodos basados en las vibraciones, con lo que se han instalado receptores GPS que permiten conocer el desplazamiento y acelerómetros que proporcionan medidas de aceleración. Estos dispositivos se han colocado en lugares estratégicos del puente de tal forma que si lo que interesa conocer es, por ejemplo, únicamente una dirección de la aceleración, se han instalado acelerómetros más simples, mejorando así la eficiencia técnica y económica. Por último, también se han

instalado sensores de temperatura y anemoscopios, los cuales permiten conocer la dirección y la velocidad de una carga muy relevante como es el viento. Las características de todos los sensores, como pueden ser los rangos de medida, los errores o los rangos de temperatura a los que pueden trabajar, están bien definidas por los fabricantes y son decisivos a la hora de escoger un dispositivo para cada objetivo concreto.

El siguiente elemento del sistema de SHM que complementa a los sensores es el sistema de adquisición de datos. Este proyecto emplea un *software* llamado LabVIEW para escribir el programa que permitirá a los módulos de captación leer las señales provenientes de los sensores. Los desarrolladores han decidido emplear dos dispositivos de captación distintos, en función de los requisitos de los sensores: uno para los acelerómetros y los anemoscopios y otro diferente para los sensores de fuerza, pero ambos se conectan a los sensores con un sistema cableado conocido como PCI. Dichos dispositivos transforman las señales eléctricas en información digital. Teniendo en cuenta la velocidad a la que cada aparato registra sus magnitudes se ha llegado a la conclusión de que el sistema GPS es el más lento, con lo que todo el sistema de SHM se ha definido para que trabaje con su misma tasa de toma de datos. Para acabar con esta rama del sistema hay que destacar que, con el fin de no acumular información innecesaria y de ahorrar recursos, sólo se realiza la monitorización durante las horas de tráfico más intenso y durante eventos extremos como un terremoto.

Para complementar al sistema de adquisición de datos se define el sistema de transmisión, aunque ambos pueden considerarse como uno solo. Para empezar, toda la información se reúne en un ordenador industrial situado en el mismo puente. Hasta este ordenador llega la señal de los dispositivos de adquisición mediante cables, y la información GPS llega sin el uso de estos. Desde el ordenador instalado *insitu* se precisa enviar la información hasta las oficinas pertinentes, pero debido a la ausencia de internet en la zona se ha decidido utilizar un sistema desarrollado por la empresa Motorola que, usando un emisor y un receptor, permite cubrir hasta 15 km. Con todo esto, los responsables del proyecto han conseguido captar las magnitudes necesarias y hacerlas llegar hasta el lugar deseado donde poder estudiarlas.

Otro elemento del sistema es la base de datos. Se trata de una recopilación de toda la información conocida de la estructura, la previa a la monitorización y aquella que se conoce como resultado de esta. Este elemento es esencial para la existencia del siguiente: el análisis estructural y la interpretación de datos. A partir de todos los datos obtenidos se pueden aplicar los métodos de detección de daño conocidos, lo que permite tener actualizado un modelo basado en elementos finitos desarrollado especialmente para este puente. Este modelo permite tener una base muy robusta a la hora de realizar simulaciones, evaluar las condiciones de seguridad y calcular la capacidad portante del puente y así regular el tráfico permitido. Además, en caso de darse una situación no deseada se ha definido que el sistema emita un aviso. El apartado de análisis también incluye un análisis estadístico de los parámetros del viento, así como un análisis de la influencia de las condiciones ambientales, como el viento y la temperatura, y las distintas cargas a soportar en el comportamiento del puente. Para acabar, y sabiendo que los cables son unos elementos cruciales en la estabilidad de la estructura, se ha diseñado un seguimiento específico que compara las tensiones

soportadas en los cables, de forma que si la tensión en uno disminuye mientras que en sus vecinos no se aprecia este cambio, se puede afirmar que ese cable está sufriendo algún daño.

Todos los elementos expuestos que conforman el sistema de SHM final pueden apreciarse en la figura 2, en la cual además se muestra la localización de los distintos sensores dentro de la estructura del puente.

Lo último que queda por explicar de este proyecto es que tras dos años de servicio se realizó una monitorización bajo condiciones de carga controladas. De esta forma se pudo validar el sistema y confirmar que todo seguía funcionando correctamente. Cabe destacar que esta práctica de validación es muy importante, ya que no existen muchos ejemplos de casos tan completos de SHM y gracias a estos autores se ha podido obtener una información muy valiosa.

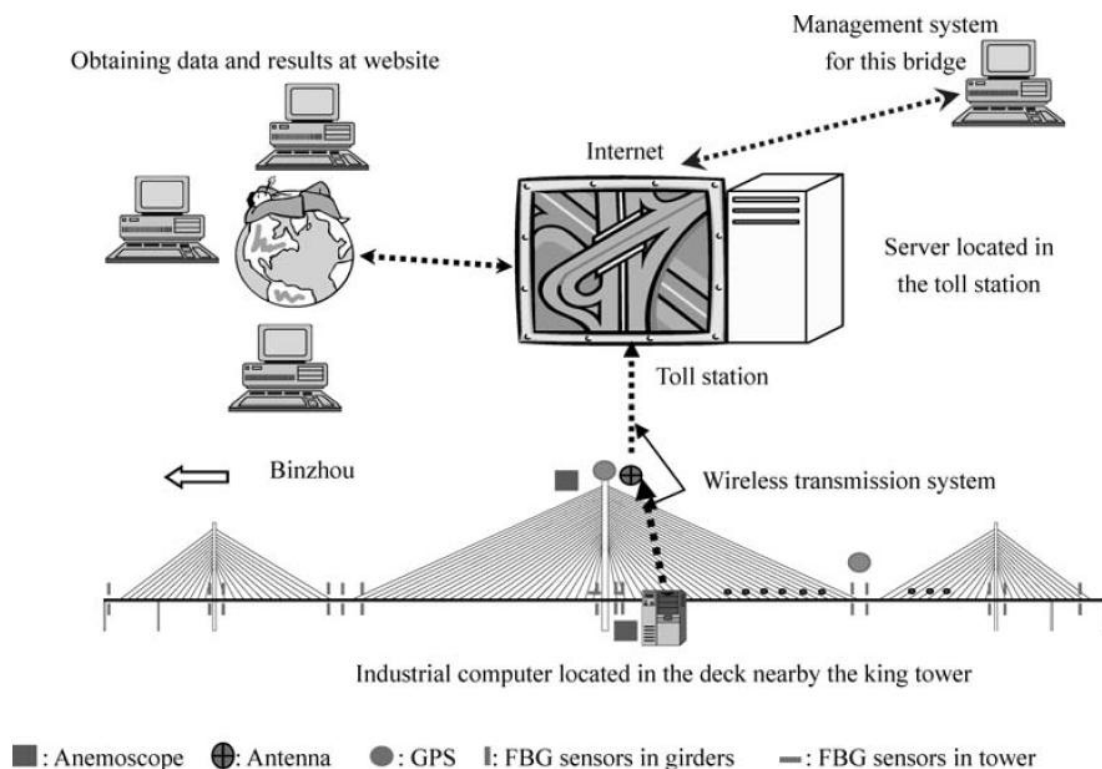


Fig. 2 Elementos que conforman el sistema de SHM del puente sobre el río Amarillo

Li et al. [8]

2.6. Análisis en tiempo real

Con todo lo que se ha expuesto hasta ahora, el nuevo campo del SHM podría verse como una recopilación de datos relacionados con una infraestructura concreta y que permiten evaluar, a posteriori, la salud actual de esta. Dichos datos son captados continuamente mediante dispositivos instalados de forma permanente o bien son registrados durante campañas de monitorización, es decir, periodos que se alargan un tiempo definido. Así pues, la

recopilación de información permite estudiar las condiciones del elemento de interés y, en consecuencia de los resultados que se extraigan, tomar las decisiones de actuación más adecuadas.

No obstante, la monitorización estructural sigue avanzando y va incluyendo nuevos conceptos que van enfocados siempre a la mejora tanto de las técnicas de construcción como del control durante la vida útil de las infraestructuras. En este sentido aparece la idea de poder analizar los procesos de tal manera que las actuaciones pertinentes se puedan llevar a cabo casi inmediatamente, lo que se conoce con el nombre de análisis en tiempo real. Esta novedad implica incluir más dispositivos a los ya empleados previamente en SHM, unos dispositivos que permitan procesar los datos de forma autónoma y otros que sean capaces de transmitir los resultados a los usuarios. De todas formas, el sobre coste de los aparatos adicionales requeridos se ve sobradamente justificado por los beneficios que el nuevo sistema aporta.

A continuación se presentarán una serie de ejemplos que buscan, mediante el análisis a tiempo real, una respuesta mejorada y que permiten entender mejor en qué consiste este concepto, que como se verá puede ser aplicado en distintas ramas de la ingeniería civil. Dichos ejemplos también se pueden tomar como una ampliación de las posibilidades del SHM ya descritas, ejemplificando muchos de los conceptos que han ido apareciendo, en añadidura a que todos son útiles para empezar a ver como se puede estructurar un sistema que proporcione un *feedback* en tiempo real. Cabría destacar que todos los artículos relacionados con este tema que se van a exponer han sido publicados a partir del año 2014, un hecho que denota la juventud de esta rama tan específica de la ingeniería civil. Además, como el resto de artículos ya presentados, se han obtenido de revistas de vanguardia como son “Engineering Structures” o “Automation in Construction”, referentes en este ámbito de estudio.

Sistema de monitorización en tiempo real para controlar espesores de capas en la construcción de carreteras

Un primer ejemplo, muy representativo de la idea del tiempo real, ha sido concebido con el fin de mejorar la construcción de firmes, ya que es recurrente encontrarse con problemas de deterioro de pavimentos prematuros. Liu et al. [9], conscientes de la importancia de fabricar buenas capas en este tipo de infraestructuras, han desarrollado un método de monitorización a tiempo real del grosor de los componentes de un pavimento. Así pues, la monitorización se debe centrar en la fase de construcción, un período durante el cual, según los autores, el control de calidad empleado habitualmente se aleja bastante del óptimo deseado. Esta afirmación la basan en el hecho de que las medidas son tomadas manual y visualmente por operarios, lo que lleva a precisiones inferiores a las posibles con la tecnología actual y, además, a trabajar con poblaciones de muestras que pueden pasar por alto zonas donde no se cumplen los requisitos estipulados. Asimismo, este artículo destaca la falta de medios que permitan corregir errores durante la fabricación de las distintas capas, lo que ha impulsado definitivamente este estudio.

El método de monitorización ideado requiere dos elementos básicos: una plataforma que sirva de soporte para una serie de dispositivos y una estación total robotizada. Por su lado,

la plataforma es un carro que se mueve traccionado por la pavimentadora y cuyo cuerpo es esencialmente una barra, la cual permite incorporar sensores laser, para medir la distancia hasta la carretera creada, y un inclinómetro, que es capaz de medir el ángulo de dicha barra. Además, la plataforma está dotada con un prisma de 360 grados que funciona en todas la direcciones y que complementa a la estación total, la cual busca automáticamente al prisma y determina su posición en tres dimensiones. De esta forma, los datos que se van recopilando son los siguientes: las distancias entre los sensores laser y el firme, la inclinación de la barra y la localización espacial. Para poder correlacionar toda la información también se incorpora una variable consistente en el tiempo en que se toma cada medición. Finalmente, el conjunto de variables se transfiere de forma inalámbrica a una base de datos, concretamente mediante tecnología GPRS. Lo que se busca es conseguir un flujo de datos continuo, el cual se consigue con una red inalámbrica bien estudiada, utilizando el sistema óptimo para cada par de dispositivos de comunicación.

El siguiente paso consiste en procesar la información adquirida, para lo que se requiere introducir otras variables en el programa encargado de los cálculos. Es necesario conocer la geometría de la plataforma: longitud de la barra, posición y altura de los sensores láser y altura del prisma. Si se añade un datum de referencia, ya sean las coordenadas de la superficie a pavimentar o las de la monitorización de la capa anterior, y el grosor deseado de la nueva capa, ya es posible calcular el grosor que se está construyendo en cada momento y saber dónde se cumple o no el requisito.

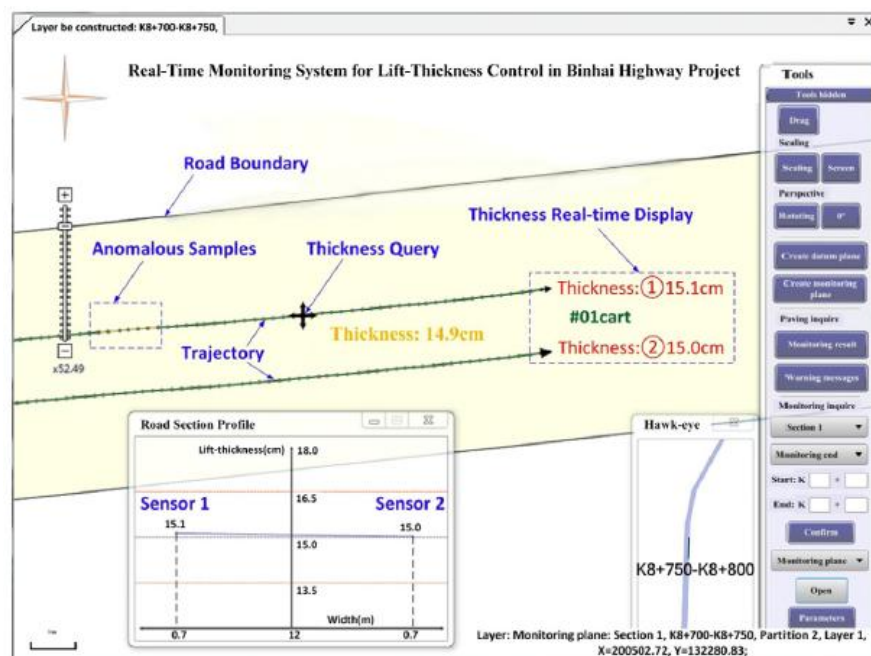


Fig. 3 Pantalla de visualización para la monitorización de espesores en carreteras que ofrece resultados en tiempo real

Liu et al. [9]

Haciendo referencia ahora al análisis en tiempo real, todo este montaje permite alcanzar tres objetivos que son una novedad en la monitorización de infraestructuras y que surgen una vez se consigue el flujo constante de datos. El primero de ellos es la posibilidad de visualizar en una pantalla los resultados de procesar los datos adquiridos en cada momento (Fig.3), de una forma simple pero a la vez eficaz a la hora de mostrar la información esencial. Con ello se logra que un operario cualificado pueda interpretar rápidamente, con un simple vistazo, qué está sucediendo en la obra. El siguiente objetivo alcanzado es el hecho de poder obtener un informe más completo, con una colección más amplia de parámetros relevantes en la construcción de firmes, pero siempre en el momento en que se desee, sin esperar a que el proceso finalice. Para acabar, la última novedad es la inclusión de un sistema de alarma que se ejecuta de forma automática y que avisa a los operarios cuando un punto no cumple los requisitos, indicando el lugar exacto de este, el grosor que tiene y el que debería tener.

Por tanto, se puede extraer que la inclusión de la monitorización en tiempo real permite añadir nuevas herramientas a la construcción de carreteras, unas herramientas que a su vez permiten corregir errores en una fase en la que la inmediatez es crucial.

Monitorización en tiempo real de la calidad de compactación de una carretera

Las limitaciones en el control de calidad a la hora de compactar un firme, de la misma manera que ocurría en el ejemplo anterior, han hecho que Liu et al. [10] investiguen sobre cómo monitorizar de forma adecuada este proceso. Los autores pretenden encontrar una solución al rápido deterioro que se presenta en muchas carreteras a causa de una mala compactación, pero a la vez quieren alejarse de la toma manual de muestras, no siempre representativas del conjunto de la infraestructura, que en ocasiones resulta destructiva y que obliga a detener la obra. Añadido a todo esto, hay que tener en cuenta el tiempo de análisis de las muestras en el laboratorio, un hecho que imposibilita por completo actuar inmediatamente frente a cualquier contratiempo, y que resalta la necesidad de introducir el tiempo real en la monitorización de la compactación.

El campo de la monitorización de la compactación no es especialmente novedoso. Conocidas como compactación inteligente (IC por sus siglas en inglés), existe un grupo de tecnologías que se han ido usando en la construcción de esta obra lineal concreta y que se han empleado con mejores o peores resultados. Partiendo de parámetros del suelo y de otros relacionados con los rodillos compactadores, distintos valores han sido definidos con la finalidad de estimar el grado de compactación. No obstante, estos valores no siempre han respondido con la precisión adecuada, por lo que los autores del presente artículo han definido el valor E, llamado “poder de compactación por unidad de volumen”, y también han decidido emplear el valor ya definido CMV (Compaction Meter Value). La monitorización se basará en estos dos valores tras haber comprobado previamente que ambos son complementarios a la hora de relacionarlos con el grado de compactación.

La introducción del análisis a tiempo real empieza con el uso de un sistema GPS, el cual detecta una antena situada sobre el rodillo vibratorio y mediante una red GPRS comunica de forma constante esta información. Sabiendo las dimensiones de las máquinas de

compactación, la posición 3D de cada instante permite crear una malla que represente el firme, y desde un ordenador ya se puede calcular, para cada punto de la malla y para cada instante de tiempo, la velocidad de la máquina de compactación, el número de pasadas y el grosor compactado. Para poder calcular el valor CMV se debe instalar un acelerómetro en el tambor del rodillo, lo que permite obtener la aceleración vertical de este. Para calcular el valor E se utiliza la información derivada del sistema GPS, pero también es necesario conocer otros parámetros del rodillo tales como la carga radial, la frecuencia angular y la amplitud de la vibración o la excentricidad, entre otros. Hasta ahora, desde un ordenador central, podemos conocer las trayectorias de la máquina de compactación, las pasadas, la elevación y el grosor compactado, unos parámetros para los cuales, si son diferentes a los planeados, se ha ideado un sistema de alarma que avise a los operarios para que puedan actuar en respuesta. Por último, y haciendo uso de unas curvas de regresión que deben ser construidas previamente basándose en los valores E y CMV y en los parámetros del suelo de compactación y humedad, es posible pasar de los valores, obtenidos en tiempo real, al grado de compactación de cada punto, también de forma instantánea.

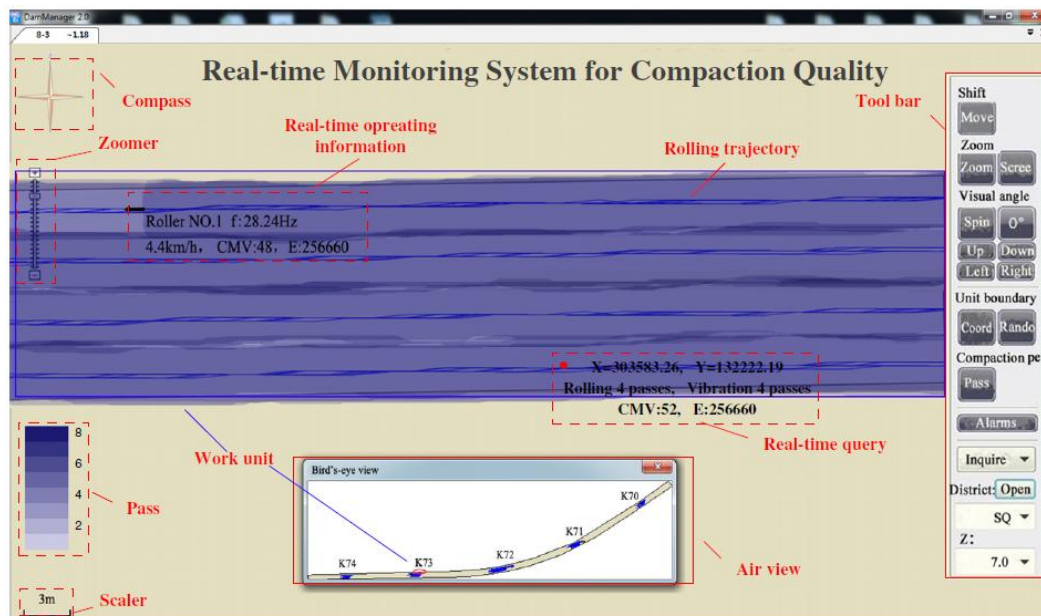


Fig. 4 Pantalla de visualización para la monitorización de la compactación en carreteras que ofrece resultados en tiempo real

Liu et al. [10]

Es importante explicar que el sistema ideado incluye una interfaz de visualización (Fig.4) muy práctica, donde se pueden apreciar de forma rápida todas las variables calculadas, lo que permite tener un seguimiento mucho más exhaustivo del proceso. Además, los autores incluyen la posibilidad de obtener un mapa en colores del firme construido, indicando las zonas donde el trabajo no es óptimo, con lo que se puede volver a actuar para adecuar el grado de compactación. Cabe destacar que toda la información es guardada en una base de datos que, en un futuro, posibilita estudiar la calidad de la compactación de toda la obra.

Monitorización del grado de corrosión en tiempo real

La meta de poder controlar el grado de corrosión en redes de tuberías que se encuentran expuestas a condiciones climáticas severas y sometidas a alta presión, como pueden ser los conductos de gas o de aceite, ha llevado a Al Handawi et al. [11] a desarrollar un sistema propio de monitorización de esta propiedad. La ventaja de este estudio es que el sistema desarrollado puede ser aplicado a otros tipos de estructuras también sometidas a una carga mecánica, siempre devolviendo información al usuario en tiempo real.

Los autores han llevado a cabo una serie de experimentos para demostrar la hipótesis en que se funda su estudio, la que defiende que es posible relacionar la tensión en un material con su grado de corrosión. Para ello han acelerado el proceso corrosivo y, mediante el uso de sensores de tensión, tanto de fibra óptica como eléctricos, han acabado concluyendo que su hipótesis es cierta.

Siguiendo los pasos que se describen en el artículo, es posible conocer en tiempo real cual es el estado de una infraestructura en cuanto a corrosión, empleando únicamente sensores de tensión instalados adecuadamente en ella. Será necesario implementar un sistema que transmita la información hasta un ordenador central, desde donde calculando la derivada de la tensión respecto al tiempo, y empleando la relación conocida por los experimentos previos, un usuario puede conocer el estado corrosivo actual de la estructura en el instante que lo desee. Para acabar, se puede destacar el hecho de que los autores están monitorizando una propiedad difícil de estimar de forma instantánea, el grado de corrosión, a través de una propiedad sencilla y económica de obtener, cuya monitorización está bastante estudiada y que permite ser captada y procesada en tiempo real, que es la tensión.

Sistema de monitorización del lavado de sedimentos en tiempo real para la evaluación de la seguridad en puentes

La utilidad de la monitorización en puentes puede verse ampliada si los resultados extraídos son capaces de prevenirnos frente al colapso en tiempo real. Esta idea es puesta en práctica por Lin et al. [12] en su estudio de un sistema de monitorización del lavado de sedimentos en las cimentaciones de la estructura, un proceso peligroso en caso de que la profundidad encastada en el terreno no sea suficiente, ya que la probabilidad de fallo sin previo aviso es elevada.

Los autores de este artículo han aprovechado estudios anteriores en los cuales se demuestra que el colapso de este tipo de estructuras, consecuencia de la pérdida de capacidad portante del terreno, está regido por un movimiento de sólido rígido. Sabiendo esto, y aprovechando también otros estudios en los que se analizan las frecuencias de vibración de puentes, los autores han desarrollado un sistema propio de análisis de dichas frecuencias. Este sistema incluye un índice de estabilidad para determinar el grado de seguridad en relación al estado de las cimentaciones, cuyo deterioro sería el desencadenante del fallo.

Para caracterizar el comportamiento de un puente se han empleado sensores de velocidad, unos sensores cuyo funcionamiento es bastante conocido y estudiado y que

permiten conocer la vibración que sufre la estructura. Además, dichos sensores aportan una serie de datos que son fáciles de manejar, de forma que, si se es capaz de analizarlos de forma adecuada, la información que se extraerá será característica del puente en el instante en que se obtenga. En definitiva, siguiendo el procedimiento expuesto por los autores a la hora de tratar las magnitudes físicas obtenidas con unos sensores relativamente sencillos, es posible determinar cuando el movimiento de un puente sigue el patrón de un sólido rígido, es decir, cuando la seguridad de este no es la adecuada y avisarnos con el tiempo suficiente como para poder reaccionar. Se debe destacar que en estos casos la inmediatez que aporta el análisis a tiempo real es crucial, ya que el colapso no mostraría aviso alguno y, por lo tanto, es la única forma de evitar daños mayores.

Método para la monitorización en tiempo real de la deformación de puentes

También relacionado con la salud estructural de puentes, Helmi et al. [13] han ideado un método de monitorización en tiempo real de la deflexión de dichas estructuras, una medida que permite conocer si existen daños o cambios estructurales. Para controlar este parámetro en puentes existen muchos métodos, todos ellos estudiados previamente por otros autores, pero para poder conseguir una monitorización en tiempo real y a largo plazo hasta ahora sólo se ha podido utilizar un tipo de tecnología que requiere de un punto fijo de referencia. Esto último supone un problema cuando dicho punto no se puede garantizar.

La importancia de conocer el estado de una estructura en tiempo real se demuestra cuando los autores buscan soluciones para preservar esa característica de inmediatez. El sistema de monitorización propuesto no precisa de un punto de referencia fijo, en vez de eso, para calcular la flecha del puente se emplean los valores de rotación y curvatura de este. Para ello, unos inclinómetros, unos sensores de tensión y otros de desplazamiento, todos ellos situados en puntos específicos a lo largo del puente, aportarán la información necesaria para, tras unos cálculos, conocer la deformada del puente. Finalmente, es necesario contar con una estación de recepción continua de la información de los sensores, donde poder realizar los cálculos o enviar la información hasta una central en todo momento. De todas formas, como se están estudiando puentes, el espacio para emplazar el equipamiento necesario no debería ser un problema

Para acabar, se puede remarcar que los autores del presente artículo también proponen el empleo de elementos finitos añadido al sistema propio diseñado. De esta manera, se amplían las posibilidades de análisis y visualización de los resultados.

Sistema de monitorización de la salud estructural de puentes basado en el Internet de las Cosas

Este artículo desarrollado por Lazo et al. [14] busca mejorar un Sistema de Gestión de Puentes gracias al concepto del tiempo real. Para empezar, este tipo de sistemas tiene como finalidad evaluar el estado de una estructura a partir de un registro de datos históricos, el cual se va actualizando mediante inspecciones. Al final, se pretende usar dicha información para

tomar decisiones en cuanto a mantención y reparaciones, ya que el SGP se complementa con otros registros como pueden ser los inventarios, los costes y las opciones de mantención.

Por otro lado, este estudio se centra en el concepto vanguardista del Internet de las Cosas, es decir, la capacidad existente hoy en día de entablar comunicación entre objetos cotidianos. Si el también llamado IoT, por sus siglas en inglés de *Internet of Things*, permite actualmente tener avisos en nuestro Smartphone de cualquier electrodoméstico, por ejemplo, por qué no plantear un uso enfocado a la ingeniería. Los autores analizan los diversos protocolos de comunicación sin cables ya existentes, buscando costes y consumos de potencia reducidos, aun sabiendo que esto implicará restricciones futuras. Sin entrar en detalles concretos, las investigaciones llevadas a cabo permitieron ver que es posible obtener información en tiempo real de un puente a través del IoT, empleando protocolos de comunicación bien seleccionados, un acelerómetro y a un dispositivo de *hardware* libre que se presentará más adelante, la placa Arduino. De esta manera, un Sistema de Gestión de Puentes puede ser actualizado sin necesidad de inspecciones, en tiempo real y empleando tecnología que, a priori, no implica un gran aumento de los costes.

Como se ha visto, este ejemplo introduce la idea del Internet de las Cosas y del uso de hardware libre en la ingeniería civil, ambos conceptos bastante novedosos y que enlazan perfectamente con el siguiente sub-apartado del trabajo: la Fabricación Digital.

2.7. Fabricación Digital

En paralelo al desarrollo del campo de la monitorización de la salud estructural también ha surgido durante los últimos años el concepto de Fabricación Digital. Esta nueva idea no está relacionada directamente con la ingeniería civil, pero debido a su gran versatilidad y a su gran capacidad para involucrarse en casi cualquier ámbito, científico o no, ha sido incluida en este trabajo. Como se verá más adelante, la Fabricación Digital es una de las piezas clave en el desarrollo del presente proyecto. Hay que decir que para poder mostrar los conceptos más importantes se ha obtenido información de los artículos de Fox, S. [15] y Lee, M. [16].

Para empezar, se puede definir la Fabricación Digital como un movimiento que aparece aproximadamente a partir del año 2000 y que se basa en dar forma física a ideas y diseños propios, relacionados con cualquier ámbito imaginable, mediante la construcción de prototipos hechos por uno mismo. Más concretamente en el año 2005 nació la revista *Make*, una publicación sobre proyectos desarrollados bajo el concepto *Do It Yourself* (en español: hazlo tu mismo) de la mano de la editorial informática y tecnológica estadounidense O'Reilly Media. Esta revista dio cara y nombre a la tendencia emergente, que pasó a conocerse como movimiento *Maker*, y al cabo de un año de su creación se celebraron las primeras *Maker Faires*, eventos donde se exponen todo tipo de proyectos y se comparten ideas para futuras creaciones. Las ferias originales tuvieron lugar en Estados Unidos, pero al poco tiempo también empezaron a celebrarse en ciudades de todo el mundo.

Los prototipos que surgen de la Fabricación Digital pueden ser objetos, dispositivos o incluso espacios que gracias tanto a hardware como a software libre y utilizando tecnologías

vanguardistas de fabricación permiten obtener un producto final que cumple una función concreta y deseada por su fabricante. Se debe destacar que el movimiento *Maker* pretende alejarse de la típica producción en cadena para acercarse más a una producción artesanal que responda a necesidades personalizadas. Además, para ser justos con esta corriente, es preciso exponer su filosofía autodidacta e innovadora, que busca la creación de prototipos hechos por uno mismo pero a la vez en colaboración con otras personas y compartiendo siempre los resultados, lo cuales parten necesariamente de tecnología *open source*.

Una pieza clave hoy en día en la Fabricación Digital es la existencia del ya mencionado hardware libre. El término libre hace referencia al hecho de que sean dispositivos que tienen unos diseños, unos esquemas y unas especificaciones que son de acceso público. Además, suelen contar con la gran ventaja de tener precios considerablemente económicos, un hecho que los hace más accesibles. Existen bastantes ejemplos de proyectos de hardware libre y a continuación se presentan algunos de los que Velasco JJ. expone en su artículo [17]:

- Raspberry Pi, un ordenador de tamaño muy reducido y de una sola placa.
- Cubieboard, un proyecto similar a Raspberry Pi y que pretende incluir mejoras.
- Open Compute Project, una iniciativa que busca motivar el diseño y creación de servidores informáticos independientes.
- Uzebox, una videoconsola libre.
- Impresoras 3D, una ejemplo de tecnología de fabricación aditiva que se explicará más adelante y que cuenta con proyectos de diseño abierto como RepRap, cuyo objetivo es poder reproducirse a sí misma, abaratando costes y popularizando esta tecnología.



Fig. 5 Placas Arduino UNO y Genuino UNO
<https://www.arduino.cc> [18]

Pero el proyecto más destacado quizá sea la plataforma de hardware libre Arduino (Fig.5). Se dice que es el más destacado debido a su gran popularidad, aunque en el ámbito *Maker* están irrumpiendo cada vez con más fuerza otros proyectos similares, incluso algunos de los ya mencionados. Arduino cuenta con un microcontrolador y un entorno de desarrollo que permiten la interacción entre el mundo físico y el mundo digital de un ordenador. Esto es posible gracias a la ayuda de dispositivos electrónicos como sensores, ledes o motores y a la

simplicidad de su conexión con la placa. Una gran ventaja de esta plataforma, aunque no exclusiva suya, es el hecho de ir acompañada de un software propio, también libre y que funciona con un lenguaje de programación de alto nivel, es decir, fácilmente comprensible por el usuario. Esto último nos lleva a otro elemento esencial de la Fabricación Digital: los programas libres.

El *software* libre, como expone en su página web Free Software Foundation [19], son aquellos programas informáticos que, bajo decisión de los creadores, dan a los usuarios la libertad de ejecutarlos, copiarlos, distribuirlos, estudiarlos e incluso modificarlos o mejorarlos. Así pues, se trata de un concepto que abarca un abanico inmenso de posibilidades, existiendo software libre relacionado con infinitud de temáticas. Por todo lo expuesto, estos programas encajan perfectamente en la ideología *Maker* y son ampliamente usados para complementar a los dispositivos libres, pero de todas formas no excluyen la utilización del resto de programas o *software* propietario. Cabría destacar el concepto de código abierto, el cual se desmarca del *software* libre en el sentido de que lo que se pretende es compartir las creaciones propias, de forma que cualquier persona pueda al menos leer los códigos en los que se basan los proyectos de otros desarrolladores con la finalidad principal de inspirarse y adaptar las ideas a los proyectos propios. Este último concepto persigue siempre alcanzar resultados óptimos a través del conocimiento colectivo pero sin copiar otros trabajos.

Una vez presentados tanto el hardware como el software libre ya se puede pensar en la fabricación de prototipos usando esta tecnología. Por un lado, existen prototipos basados únicamente en dispositivos de hardware libre que son interactivos y que funcionan de forma autónoma. Para mostrar mejor este concepto, un ejemplo es el pequeño proyecto desarrollado por el espacio *Camins Makers* [20], de la *Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona*, que mediante sensores de luz, un motor y una placa Arduino es capaz de hacer que un objeto se oriente de forma autónoma hacia la fuente lumínica. Esta simple idea puede tener diversas aplicaciones muy útiles, en el campo del aprovechamiento energético por ejemplo, utilizando muy pocos recursos. Otros proyectos relacionados con la robótica o con la domótica, acompañados siempre de dispositivos electrónicos, serían también típicos ejemplos, de los cuales pueden encontrarse muchos en una página oficial de Arduino [21].

Por otro lado, hay proyectos que van un paso más allá y que buscan la interacción de hardware libre con programas informáticos. Se puede destacar que el software más adecuado para la Fabricación Digital es aquel sencillo de utilizar pero que ofrece el mayor potencial y, además, ofrece compatibilidad con lenguajes de programación populares y con otros programas. Paradigma de esta afirmación es el *software* de programación visual, en otras palabras, *software* que permite crear aplicaciones de forma muy intuitiva, como *Grasshopper*, cuyo objetivo es el modelado en tres dimensiones, o *Pure Data*, que permite procesar y crear imágenes, videos y audios. Más ejemplos pueden ser *GarageBand* y *Logic*, ambos programas de edición de audio, y *Processing*. Este último ejemplo nace el año 2001 como un proyecto de dos ingenieros del MIT: Casey Reas y Benjamin Fry. Como explican en su página web [22], *Processing* permite crear contenido gráfico en un entorno de desarrollo integrado, es decir, utilizando su propio lenguaje de programación pero siendo éste muy sencillo. Además, tiene como principal objetivo acercar a cualquier usurario sin nociones de programación a un

entorno en el que se obtienen resultados visuales inmediatos desde el momento en el que comienza el aprendizaje. Por estas razones se puede destacar este software, pero hay que añadir el hecho de que tenga un lenguaje propio muy simple y, además, basado en uno muy popular y conocido como es Java, y el hecho de que el entorno de desarrollo de *Arduino* este a su vez basado en el de *Processing*, lo que favorece el uso conjunto de ambas plataformas en cualquier tipo de proyecto.

Todo el *software* expuesto tiene en común el valor añadido que aporta la interacción entre el mundo físico, representado por dispositivos como microcontroladores, sensores y motores, y el mundo digital, representado por los programas. Esta interacción permite generar contenido digital a partir de estímulos físicos, de la misma forma que permite generar acciones físicas en respuesta a *inputs* electrónicos, con todo el potencial que de ahí se deriva. Es sobre todo en esta clase de proyectos más complejos donde entra en juego la ingeniería civil, puesto que se les puede dar una respuesta a los datos físicos que se obtienen, sean del ámbito que sean, procesándolos y mostrando algún resultado.

Para concluir, la Fabricación Digital se sirve de objetos corrientes para crear sus proyectos, dándoles otros usos y combinándolos con los dispositivos ya expuestos. Se utilizan toda clase de maderas, plásticos, metales o cualquier otro material, nuevo o reciclado, para dar forma a los prototipos ya sea como soporte estructural del hardware o como parte funcional del producto final. De todas formas, muy a menudo se requieren objetos concretos, adaptados a una idea muy específica y con formas muy particulares. Por todo esto, el tercer elemento clave de la Fabricación Digital son las tecnologías de fabricación modernas aditiva y sustractiva, que permiten la obtención de estas piezas determinadas.

Por su lado, la tecnología aditiva, más conocida como impresión 3D, se basa en acumular finas capas de un material determinado de tal manera que al final se obtenga un elemento tridimensional concreto. La forma del objeto en cuestión proviene siempre de un modelo digital previo que puede realizarse con cualquier programa de modelado en tres dimensiones. Ejemplos típicos ingenieriles son los programas de diseño AutoCAD 3D y Solidworks.

La historia de la fabricación por adición comienza con la aparición en el año 1983 del concepto de la estereolitografía y con la irrupción en el mercado de las primeras impresoras basadas en esta idea, cinco años más tarde y gracias a la empresa 3D Systems. Como bien explica Sánchez S. [23] en su artículo, la técnica de la estereolitografía consiste en solidificar capas consecutivas de una resina en estado líquido con la ayuda de un haz de luz ultravioleta, en función del diseño deseado y a medida que se va sumergiendo la base del objeto en el material líquido. Para conseguir resultados óptimos es preciso realizar un post-tratamiento en el horno.

La impresión en 3D evolucionó en los siguientes años de forma que a finales de los 80's ya existían nuevas técnicas, cuyo funcionamiento puede entenderse gracias a la página web de la compañía Stratasys [24]. Una de estas nuevas formas de impresión es el *Fused Deposition Modelling* (FDM), consistente en la extrusión y consecuente solidificación de un material termoplástico fundido a través de una boquilla que lo va colocando capa a capa. Las impresoras FDM son, en general, las más usadas en el ámbito doméstico, y puede verse un

ejemplo en la figura 6. También alrededor de los años 1990 apareció otra técnica llamada *Selective Laser Sinterin* (SLS) que, como su nombre indica, consiste en sinterizar o fundir partículas de polvo de algún material, desde las comunes poliamidas hasta metales, cerámica o cristal, que se solidifican por capas. Ambas técnicas son precisas y crean objetos de buena resistencia, pero a diferencia de la primera, el SLS requiere de un post-proceso debido a la rugosidad de las superficies resultantes. Aproximadamente una década más tarde apareció otra técnica de impresión tridimensional conocida con el nombre de PolyJet y que mezcla conceptos de las técnicas anteriores. Esta tecnología se basa en la acumulación de gotas de fotopolímero en estado líquido que, como en la estereolitografía, se endurece con el uso de luz ultravioleta. Una gran característica de la fotopolimerización es que permite crear formas aún más complejas mediante materiales de soporte de fácil eliminación a posteriori. Además, son capaces de combinar distintos materiales.

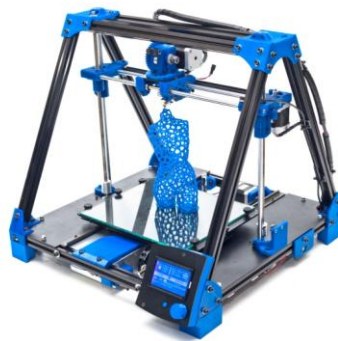


Fig. 6 Impresora BCN3D basada en tecnología FDM
<http://thegreatipproject.com> [25]

Con el comienzo de siglo la impresión en tres dimensiones pasa a ser más popular gracias a unos precios más asequibles, y con el paso de los años ha evolucionado hacia modelos de impresoras más pequeños y económicos, que mejoran las tecnologías existentes e incluyen nuevos materiales con mejores y más variadas propiedades. De todas formas, aún hoy en día es normal el uso compartido de estas impresoras en entornos de estudio o trabajo como pueden ser una universidad o un taller *Maker*, ya que, aunque se ha intentado, los costes tienen un límite inferior que impiden una implantación generalizada como ocurrió con las impresoras de tinta y papel.

Se podrían enumerar muchos ejemplos de la utilización de la tecnología aditiva en campos científicos. En el campo de la medicina se deben destacar las prótesis que han permitido mejorar la calidad de vida de personas con pérdidas de extremidades desde el año 2008, cuando se elaboró la primera pierna completa. En relación también a la medicina, Linares Clemente P. [26] explica que desde 2009 se están realizando grandes avances en la bioimpresión, es decir, en la fabricación de tejidos orgánicos mediante la adaptación de las técnicas de impresión 3D ya expuestas y con el uso de soluciones con células vivas. Las primeras estructuras que se pudieron crear correspondían a piel y cartílago, pero el avance científico ha permitido fabricar estructuras más complejas como vasos sanguíneos e incluso

órganos, como podría ser una vejiga, implantada y totalmente funcional en el cuerpo de un paciente.

En cuanto a la ingeniería, se han creado todo tipo de objetos con estas impresoras: desde pequeños engranajes de un mecanismo hasta toda la carrocería de un automóvil o un avión no tripulado completo. Antes de nada hay que exponer que no sólo es posible conseguir objetos ya acabados como resultado de la impresión tridimensional, sino que esta tecnología aporta beneficios en otras fases de los posibles proyectos. La fabricación aditiva permite también crear maquetas a escala de forma más rápida y en muchos casos más económica, de modo que se puede tener una primera idea para realizar una evaluación anticipada. Además, existe la posibilidad de crear moldes que sí darán forma a los objetos finales.

Más concretamente, en relación a la ingeniería civil están empezando a aparecer distintas aplicaciones durante los años más recientes. El uso más simple, pero no menos importante, es la fabricación de modelos reducidos que no sirven únicamente de maqueta sino que permiten realizar ensayos a escala en condiciones mucho más económicas. Dando un salto de escala, actualmente se está estudiando cada vez con más intensidad la posibilidad de crear elementos estructurales con el uso de la impresión 3D. Hay que destacar que esta idea ya se aleja de la mentalidad *Maker*, pero parece interesante remarcarla debido a su gran potencial. Desde el año 2014 y desde universidades de prestigio como el MIT, Civilgeeks [27] explica que se está analizando la utilización de hormigón como material de impresión. Esta idea revolucionaría los métodos constructivos permitiendo la creación de formas más eficientes en cuanto a resistencia, de manera que se podría reducir considerablemente el consumo de hormigón. En la misma línea de cambiar el material de impresión, y a modo de ejemplo, TIKOA expone en su blog [28] un proyecto encabezado por la empresa MX3D y que tendrá lugar en un canal de Ámsterdam que pretende crear durante el año 2017 un puente peatonal de metal fabricado con impresoras 3D. A parte del uso de metal y del concepto de la gran escala, otra novedad que introduce este proyecto es la movilidad de la impresora, que se va desplazando a medida que avanza la construcción gracias a soportes fabricados al mismo tiempo que el puente, lo que permite, de nuevo, formas mucho más libres.

La otra tecnología vanguardista de fabricación es la sustractiva, en contraposición a la ya explicada aditiva. El concepto en que se basa este modo de fabricación es partir de una pieza de material sólido bruto que se va recortando y puliendo para darle la forma deseada. Cabe destacar que se trata de una tecnología conocida durante más años y, por tanto, mucho más sólida y madura que la impresión 3D, sobre todo con materiales comunes como pueden ser la madera o el metal. El hecho de que la fabricación por sustracción esté más consolidada y sea bastante conocida suele prevalecer sobre algunas desventajas relacionadas con la generación de residuos, la peligrosidad asociada a los elementos de recorte del material, el mayor tamaño de las máquinas y el incremento de complejidad a la hora de crear el modelo digital, ya que éste requiere más detalles correspondientes a la posición de la pieza bruta, entre otros.

Los modos más primigenios de emplear esta tecnología se basan en el uso de tornos, fresadoras, taladros o sierras, pero aunque estos son muy útiles, el verdadero potencial aparece con el uso del control numérico computarizado, que se empezó a utilizar a partir de

1940 aproximadamente, en contraposición a la operación manual de las máquinas. Más recientemente se está trabajando con tecnología láser y plasma como herramienta de corte, sobretodo empleada sobre madera. Esta es una modalidad muy usada dentro del movimiento *Maker*, llegando a aparecer versiones domesticas de cortadoras laser de la mano de la empresa Glowforge [29] y consiguiendo vender casi 28 millones de máquinas en tan solo un mes, lo que pone de manifiesto la gran demanda que existe. Otra herramienta de sustracción empleada y que se diferencia bastante de las anteriores es el corte por agua a alta presión, usada sobretodo con metal, incluso cuando el espesor es grande.

Por último, se puede hablar de la versatilidad del control numérico, que permite crear formas muy precisas y complejas. Hoy en día existen máquinas muy avanzadas que cuentan con numerosos ejes y que, en consecuencia, tienen una mayor movilidad. Además, la posibilidad de adaptar herramientas de corte distintas en la misma máquina es también una característica muy atractiva.

2.8. Fabricación Digital aplicada a la Ingeniería Civil

Puesto que este trabajo pretende unir el mundo de la monitorización de estructuras con el de la Fabricación Digital, parece oportuno incluir un sub-capítulo en el que se empiece a ver la posible relación entre ellos. Esta introducción a la coexistencia de ambos conceptos permitirá entender mejor todos los procesos llevados a cabo en este proyecto y que se explicarán más adelante.

Se puede empezar teniendo presente que un sistema de SHM puede ser entendido como la unión de tres módulos que interactúan entre sí: los sensores, el DAQ y el procesamiento (en el que se puede incluir la interfaz gráfica de usuario). Si ahora se tiene en cuenta el gran potencial de la Fabricación Digital y su gran capacidad de adaptación a prácticamente cualquier ámbito, es posible empezar a pensar en crear componentes similares que puedan cumplir las funciones de cada uno de los elementos de un sistema de SHM.

El primer componente de un sistema de SHM son los sensores, unos dispositivos electrónicos muy utilizados y conocidos en todas sus gamas, es decir, desde los más potentes empleados a nivel industrial, en control de aeronaves, o en grandes estructuras, hasta los que cubren las necesidades de usuarios individuales, con unos conocimientos mínimos de electrónica e informática y con unos recursos por lo general escasos. Son estos últimos dispositivos los que precisamente están más arraigados a la Fabricación Digital, los sensores más accesibles a cualquier usuario. De todas formas, si se consigue comprender en profundidad cada uno de ellos, pudiendo escoger el más adecuado para un proyecto determinado siguiendo criterios válidos, es posible captar magnitudes físicas con una calidad suficiente como para cumplir con los requisitos de muchas monitorizaciones. Además, gracias a la filosofía del movimiento *Maker* es posible encontrar infinidad de ejemplos en los que se emplean sensores, pudiendo adaptar las soluciones ya existentes a otros casos más concretos. Si a este hecho se le añade que al trabajar con sensores más potentes no se altera la metodología, es decir, el funcionamiento y el modo de comunicarse no se ve afectado, será posible extrapolar cualquier red de sensores basada en la Fabricación Digital a una red más robusta sin alterar el planteamiento.

En cuanto al sistema de adquisición de datos, hay que tener en cuenta que la Fabricación Digital aporta varios dispositivos que pueden trabajar como ordenadores en miniatura o, si más no, repetir una serie de acciones simples pero que pueden ser suficientes para transformar la información analógica captada en información digital. Las primeras opciones que tendrían que ser estudiadas ya se han presentado anteriormente y son los dispositivos Arduino, los Raspberry Pi y los Cubieboard, ordenados de más sencillo a más complejo. Estos aparatos incluyen las entradas y salidas necesarias para conectarlos con los sensores y con el ordenador central, pero para poder emplearlos como DAQ propiamente dichos habrá que programarlos de forma adecuada, entendiendo cómo se comunica cada uno de ellos con los demás elementos del sistema y reflejando esto en sus códigos.

Para completar el sistema de SHM hará falta un ordenador capaz de recibir la información y trabajar con ella. De todas formas, el elemento realmente necesario en este último peldaño es un programa que procese los inputs procedentes del DAQ, dándoles sentido y ofreciendo unos resultados útiles. De nuevo, la Fabricación Digital ofrece soluciones variadas para elaborar por uno mismo los programas necesarios para completar cada proyecto. Por ejemplo, con unos conocimientos mínimos cualquiera puede ser creadores de código en Java, Python o Processing, entre otras posibilidades, e ingresar todos los procedimientos que el ordenador debe seguir una vez recibe la información. Además, mediante un código escrito en cualquiera de estos tres lenguajes, aunque hay que hacer hincapié en que existen muchas otras soluciones para conseguir una aplicación propia, es posible también conseguir una Interfaz Gráfica de Usuario, la que en muchas ocasiones es requerida para poder visualizar los resultados en un entorno más atractivo que una simple lista de valores.

Para complementar toda esta explicación se puede citar una tesis que ejemplifica la misma relación que pretende mostrar este sub-apartado. Alves C.A. [30] presenta un estudio de posibilidades para la monitorización *low-cost* de estructuras históricas empleando recursos de la Fabricación Digital. A parte de demostrar que los parámetros de interés para ese tipo de estructuras pueden ser monitorizados de forma consistente empleando la tecnología del movimiento *Maker*, el autor analiza el empleo de distintos elementos que pueden modificar el sistema final según se utilicen unos u otros. Se estudian distintas fuentes de energía para el sistema: conexión a la corriente, batería y energía solar, diferentes sensores: de humedad, de temperatura y de desplazamiento, y distintas formas de transferencia de datos: Bluetooth, xBee y almacenamiento en tarjeta SD. Por último, hay que añadir que como DAQ se emplea una placa Arduino y que aunque se hace un tratamiento de los datos estos no se transmiten por medio de ninguna interfaz gráfica.

Finalmente, aunque no estén enfocados directamente a la monitorización de estructuras, pueden encontrarse otros estudios y artículos que introducen la Fabricación Digital y la filosofía *Do It Yourself* en la Ingeniería Civil y que merecen al menos ser mencionados:

- Lloret et al. [31] emplean la Fabricación Digital para crear estructuras de hormigón con formas complejas.
- Willmann et al. [32] estudian el uso de fabricación aditiva robótica para construcciones de madera.

- Gattas et al. [33] han diseñado y fabricado un tipo de estructura singular plegable.
- Chacón et al. [34] utilizan la Fabricación Digital con el fin de crear experimentos relacionados con la dinámica estructural.

Con estos ejemplos se demuestra que existen otros puntos dentro de la Ingeniería Civil que pueden verse potenciados si se emplean técnicas y elementos procedentes de la Fabricación Digital.

3. Teoría del análisis de estructuras

Este capítulo se centra en presentar la teoría física que sustenta todos los cálculos empleados en este trabajo. De la misma manera que la herramienta de análisis desarrollada ofrece dos formas distintas de estudiar los materiales: análisis elástico y análisis plástico, aquí también se exponen los conocimientos necesarios para entender los dos procedimientos empleados. Es preciso destacar que todo lo que se va a exponer se ha extraído de [35], sintetizando los aspectos importantes para el tema que nos ocupa.

3.1. Teoría elástica

Todo el análisis en régimen elástico que se realiza en este proyecto parte de la teoría de vigas de Euler-Bernoulli, en la que se centrarán las explicaciones. Dicha teoría es válida para vigas más bien esbeltas con una relación entre el canto y la longitud relativamente pequeña, sobre las que se aplica alguna carga. Además, durante la formulación no se tendrá en cuenta el esfuerzo axial, ya que si es necesario este se puede incluir al resultado final de forma muy simple, y se realiza la hipótesis de que no existe deformación por cortante, de modo que el eje de la pieza conserva su perpendicularidad con las secciones planas al curvarse. Con el objetivo de conseguir la ecuación de la elástica, se siguen razonamientos distintos que nos llevan a las ecuaciones necesarias: por un lado se estudiarán ecuaciones de equilibrio y por otro se hará uso de ecuaciones características de las deformaciones.

Para empezar, se deben definir los objetos a estudiar como piezas elásticas de plano medio, lo que equivale a decir que se cumplen las siguientes condiciones:

- La directriz de la pieza está contenida en un plano.
- Uno de los ejes principales de la sección recta de la pieza está situado en el mismo plano.
- Todas las cargas constituidas por fuerzas que actúan sobre la pieza están situadas en el plano. Si existen momentos repartidos o concentrados, sus correspondientes vectores son normales al plano.

Si además se toma el eje 3 como normal al plano de la pantalla, en dirección hacia fuera de ella, y se tiene en cuenta que los elementos a estudiar son piezas rectas, se puede dividir la viga en rebanadas teóricas infinitamente pequeñas y obtener un esquema donde el equilibrio de esfuerzos quede como en la figura 7. Hay que explicar que las cargas aplicadas que se tienen en cuenta son una fuerza $p=(p_1, p_2)$ en la dirección de los ejes e_1 y e_2 , que puede considerarse uniforme en la rebanada debido al carácter infinitesimal de esta, y un momento m .

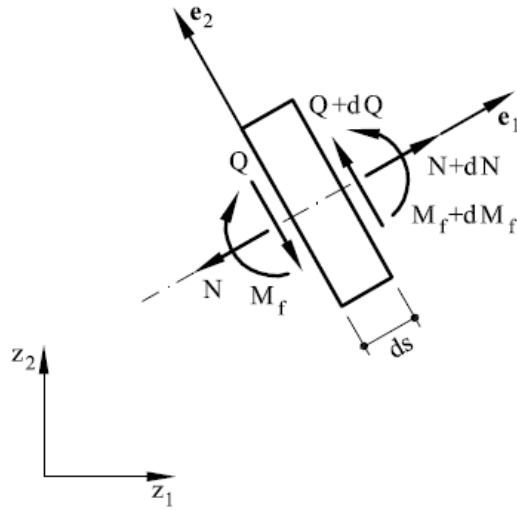


Fig. 7 Equilibrio de una rebanada de una pieza recta de plano medio
Canet, J [35]

A partir del esquema de la figura 6 se puede realizar un equilibrio de fuerzas y momentos:

$$\sum F_{e_1} = 0 \quad \Rightarrow \quad N + dN - N + p_1 \cdot ds = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{dN}{ds} + p_1 = 0 \quad (1)$$

$$\sum F_{e_2} = 0 \quad \Rightarrow \quad Q + dq - Q + p_2 \cdot ds = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{dQ}{ds} + p_2 = 0 \quad (2)$$

$$\sum M = 0 \quad \Rightarrow \quad M_f + dM_f - M_f + Q \cdot ds - p_2 \cdot ds \cdot \frac{ds}{2} + m \cdot ds = 0$$

Despreciando los infinitésimos de segundo orden:

$$\frac{dM_f}{ds} + Q + m = 0 \quad (3)$$

Y como ya se ha dicho, no se tiene en cuenta el esfuerzo axil, de modo que las ecuaciones de equilibrio interno de la rebanada, tras un cambio de nomenclatura, quedan de la siguiente forma:

$$\frac{dQ}{dx_1} + p_2 = 0 \quad (4)$$

$$\frac{dM_f}{dx_1} + Q + m = 0 \quad (5)$$

Por otro lado, la deformación por cortante γ para una pieza recta se puede definir como sigue:

$$\gamma = \frac{dv_2}{dx_1} - \varphi \quad (6)$$

Siendo v_2 y φ el desplazamiento vertical y el giro reales de la pieza. Pero como se descarta dicha deformación, se obtiene la siguiente ecuación:

$$0 = \frac{dv_2}{dx_1} - \varphi \quad \Rightarrow \quad \varphi = \frac{dv_2}{dx_1} \quad (7)$$

Para proseguir, se debe analizar la flexión de una pieza. Es preciso suponer una sección con un eje de simetría, el eje x_3 en la figura 8, donde se aplica un momento flector en el mismo plano de simetría.

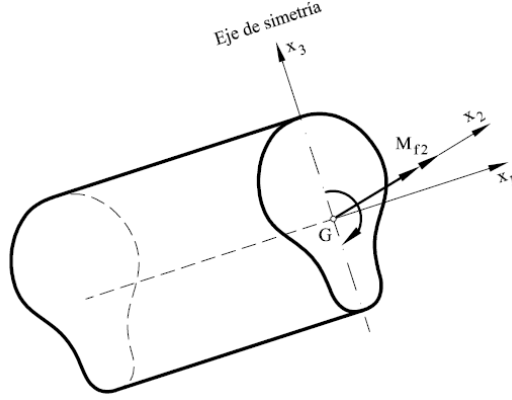


Fig. 8 Momento flector actuando en el plano de simetría de una sección

Canet, J [35]

Ahora interesa dividir esta pieza en rebanadas perpendiculares a la directriz (el eje x_1) con un grosor infinitesimal ds , como se puede ver en la figura 9. Siguiendo las hipótesis de Navier, las deformaciones son lineales y dependen únicamente de x_3 , es decir, $\varepsilon_1 = \varepsilon_1(x_3)$. Así pues, el ángulo $d\varphi$ que gira una sección respecto a la sección anterior se puede definir de la siguiente forma:

$$d\varphi = \frac{\varepsilon_1(x_3) \cdot ds}{x_3} \quad (8)$$

Por otro lado, el ángulo se puede expresar en función del radio de curvatura ρ o en función de la misma curvatura χ_2 :

$$d\varphi = \frac{ds}{\rho} = \chi_2 \cdot ds \quad (9)$$

A partir de la ecuación (9) se puede definir la curvatura como sigue, aplicando antes un cambio de nomenclatura:

$$\chi_2 = \frac{d\varphi}{dx_1} \quad (10)$$

Y uniendo las ecuaciones (8) y (9) se obtiene la deformación, que como ya se ha dicho ha de ser una función lineal dependiente de x_3 :

$$\chi_2 \cdot ds = \frac{\varepsilon_1(x_3) \cdot ds}{x_3} \quad \Rightarrow \quad \chi_2 = \frac{\varepsilon_1(x_3)}{x_3} \quad \Rightarrow \quad \varepsilon_1(x_3) = \chi_2 \cdot x_3 \quad (11)$$

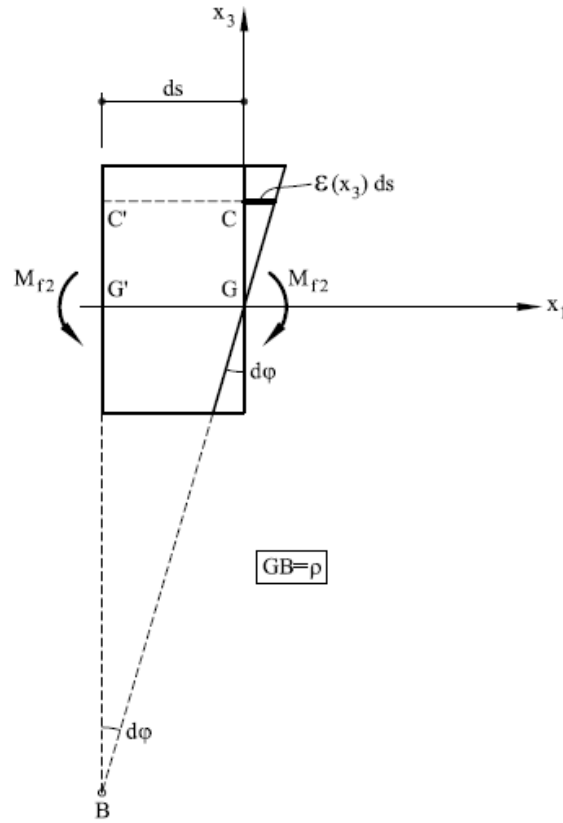


Fig. 9 Deformación de una rebanada sometida a momento flector

Canet, J [35]

Siguiendo la ley de Hooke se puede definir la tensión σ en la sección, siendo E el módulo de Young y haciendo uso de la ecuación (11):

$$\sigma_1(x_3) = E \cdot \varepsilon_1(x_3) \quad \Rightarrow \quad \sigma_1(x_3) = E \cdot \chi_2 \cdot x_3 \quad (12)$$

Finalmente, se puede calcular el momento flector empleando la ecuación (12) y sabiendo que el momento de inercia de la sección se obtiene de la siguiente forma (13):

$$I_2 = \int_A x_3^2 \cdot dA \quad (13)$$

$$M_{f_2} = \int_A \sigma_1(x_3) \cdot x_3 \cdot dA = \int_A E \cdot \chi_2 \cdot x_3^2 \cdot dA = E \cdot \chi_2 \int_A x_3^2 \cdot dA$$

$$M_{f_2} = E \cdot \chi_2 \cdot I_2$$

Simplificando la notación y aislando la curvatura:

$$\chi = \frac{M_f}{EI} \quad (14)$$

Con todas las formulaciones presentadas hasta ahora es posible obtener la ecuación diferencial de los movimientos de la viga, más conocida como ecuación diferencial de la curva elástica, haciendo referencia con este nombre a la deformada del elemento recto. A

continuación se presentarán tres expresiones distintas pero igualmente válidas de dicha ecuación: 15a, 15b y 15c.

La primera forma se obtiene uniendo las ecuaciones (7) y (10) en primera instancia:

$$\chi_2 = \frac{d\varphi}{dx_1} = \frac{d\left(\frac{dv_2}{dx_1}\right)}{dx_1} = \frac{d^2v_2}{dx_1^2}$$

E incluyendo después la ecuación (14):

$$\frac{M_f}{EI} = \frac{d^2v_2}{dx_1^2} \quad (15a)$$

La segunda forma surge de unir las ecuaciones (5) y (15a):

$$\frac{d\left(\frac{d^2v_2}{dx_1^2}EI\right)}{dx_1} + Q + m = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{Q+m}{EI} = -\frac{d^3v_2}{dx_1^3} \quad (15b)$$

Y la última forma se obtiene aplicando la ecuación (15b) a la ecuación (4):

$$\begin{aligned} \frac{d\left(-\frac{d^3v_2}{dx_1^3}EI - m\right)}{dx_1} + p_2 = 0 & \quad \Rightarrow \quad -\frac{d^4v_2}{dx_1^4}EI - \frac{dm}{dx_1} + p_2 = 0 \quad \Rightarrow \\ \Rightarrow \quad \frac{p_2}{EI} - \frac{1}{EI} \frac{dm}{dx_1} &= \frac{d^4v_2}{dx_1^4} \end{aligned} \quad (15c)$$

Gracias a la ecuación diferencial de la curva elástica será posible calcular la deformada de una viga. Si nos encontramos frente a una estructura isostática, es decir, podemos determinar sus leyes de esfuerzos recurriendo solamente a la estática, hay que obtener la ley de momentos y aplicar la ecuación (15a). La ecuación diferencial resultante se debe integrar hasta aislar la flecha, y complementando todo con las condiciones de contorno, se podrán resolver las constantes de integración y conocer finalmente la deformada deseada. Si se trabaja con estructuras hiperestáticas, aquella en las que la estática por sí sola no permite conocer las leyes de esfuerzos, hay que recurrir a otros métodos. En vigas simples hiperestáticas hay ocasiones en las que haciendo uso de las ecuaciones (15b) o (15c) se soluciona el problema, ya que sólo hay que integrar y utilizar las condiciones de contorno. Además, una vez conocida la ley de flechas y derivando ya es posible llegar a las leyes de esfuerzo y obtener las reacciones que antes era imposible conocer. Por otro lado, si la estructura hiperestática a estudiar es más complicada, como por ejemplo una viga continua, hay que recurrir a métodos de compatibilidad, donde se toman como incógnitas hiperestáticas o las reacciones de los apoyos intermedios o los momentos flectores en los mismos apoyos, o de rigidez, determinando los movimientos en los nudos.

Cuando se quiere trabajar con pórticos, en este proyecto no se plantea el objetivo de buscar la deformada de la estructura. Aunque bastaría con resolver matricialmente un pórtico para obtener los resultados de los desplazamientos deseados, su inclusión podría dar pie a otro trabajo. Lo que se pretende es mostrar las leyes de momentos, con sus momentos máximos, y las reacciones en los apoyos, por lo que no es preciso aplicar una teoría similar al caso de las vigas. Lo que si se añade en los dos casos estructurales son las tensiones normal

(16) y tangencial (17) en las secciones transversales, ambas siguiendo las siguientes expresiones:

$$\sigma = \frac{M \cdot z}{I} = \frac{M}{W} \quad (16)$$

Donde M es el momento flector, z la coordenada de interés del punto a estudiar respecto a la fibra neutra, I el momento de inercia de la sección respecto al eje adecuado y W el módulo resistente.

$$\tau = \frac{V \cdot S}{I \cdot b} \quad (17)$$

Donde V es el esfuerzo cortante en esa sección, S es el momento estático, entendido como el producto del área de la sección hasta el punto de estudio y la distancia entre el centroide de esta área y dicho punto, y b es el espesor en el punto de interés.

Todas las fórmulas utilizadas en el código de la herramienta fabricada y que se derivan de esta teoría se pueden encontrar en el anejo que se adjunta al final del presente documento.

3.2. Teoría plástica

En este sub-apartado se presentarán los procedimientos y las fórmulas empleadas para la sección caracterizada por el régimen plástico, incluido todo en el código que define la herramienta de análisis creada.

Para comenzar, y como podrá verse más adelante, hay que tener presente que se trabajará sobre una viga de sección rectangular, con dimensiones variables y material también variable. De todas formas, estos parámetros son fijados antes de realizar el cálculo, de modo que la única variable real del problema plástico será el ángulo de la deformada, introducido en cada momento por el usuario y que simula la reacción a una hipotética fuerza puntual en el centro de una viga biapoyada. De esta manera, los cálculos deben partir siempre de dicha variable, con lo que el primer parámetro a calcular será la deformación que sufre la sección central de la viga.

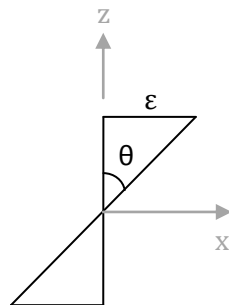


Fig. 10 Deformación de una sección

Elaboración propia

El diagrama de la figura 10 muestra la deformación de una sección ε , el ángulo girado ϑ y los ejes locales. A partir de él se puede definir la deformación como:

$$\varepsilon = \operatorname{tg}(\theta) \cdot z \quad (18)$$

Por otro lado, conociendo el tipo de material usado, y empleando tablas de fabricantes, se puede conocer el límite elástico f_y para cada caso. Aplicando la ley de Hooke, y haciendo uso también del modulo de Young E del material, queda definida la deformación límite antes de abandonar el régimen elástico:

$$\varepsilon_y = \frac{f_y}{E} \quad (19)$$

Ahora es posible comparar para cada punto de la sección si su deformación excede el límite o no. En caso de no exceder, se puede afirmar que esa fibra sigue dentro del régimen elástico, y por tanto la ley de Hooke sigue siendo válida y permite calcular la tensión que soporta dicha fibra:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon_y \quad (20)$$

Como ya se ha dicho, la sección a analizar en este apartado del proyecto será siempre rectangular, con una base b y una altura h . Sabiendo esto, su momento de inercia respecto al eje adecuado y la altura de la fibra más alejada del centro de la pieza serán:

$$I = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 \quad (21)$$

$$z_{max} = \frac{h}{2} \quad (22)$$

Y aplicando la ecuación (16) se puede extraer el momento total que crearía esa deformación de la siguiente forma:

$$M_f = \sigma \frac{b \cdot h^2}{6} \quad (23)$$

Por el contrario, si la deformación de la última fibra llega al límite, la viga entra en régimen plástico y a partir de ese momento hay que analizar las fibras plastificadas y toda la sección de forma distinta. Para poder trabajar, se ha decidido dividir la sección en un número finito de fibras, de forma que se puede comparar la deformación de cada una de ellas con el límite. Para las fibras plastificadas la tensión normal no se ve incrementada al aumentar el ángulo, con lo que pasará a ser igual al límite elástico.

Además, el momento que causaría esa deformación se debe calcular de una nueva forma. Siendo a la parte de la altura que ya ha deformado, el momento puede obtenerse a partir de la siguiente ecuación (24):

$$M_f = 2 \cdot b \cdot \left[\left(\frac{h}{2} - a \right)^2 \cdot \frac{1}{3} + a \cdot (h - a) \cdot \frac{1}{2} \right] \cdot f_y \quad (24)$$

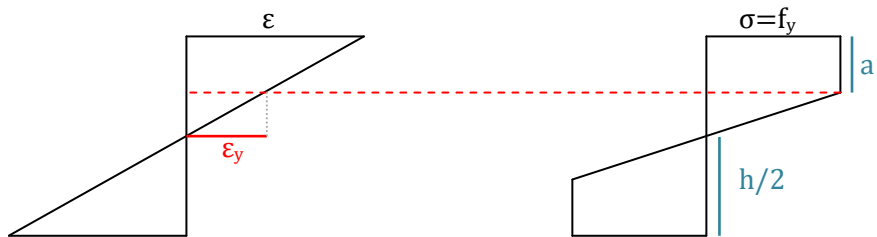


Fig. 11 Deformación de una sección y deformación límite plástico, a la izquierda, y diagrama de tensiones normales asociado, a la derecha

Elaboración propia

Finalmente, la fuerza que causaría una deformación como la insertada por el usuario en el programa se puede obtener empleando de forma inversa las fórmulas derivadas del subapartado anterior y que pueden encontrarse en el anejo.

4. Descripción del artefacto

En este capítulo se va a describir el artefacto fabricado para este trabajo, desde el modelo construido hasta la aplicación que podrá utilizar un futuro usuario, pasando por los elementos que lo conforman y la manera de funcionar de todo el sistema. Antes de nada, hay que dejar claro como se estructura el prototipo diseñado, el cual puede ser entendido como un sistema formado por cuatro módulos distintos: los elementos físicos de apoyo, los sensores, el sistema de adquisición de datos y, por último, el procesamiento de información y la muestra de resultados. Los cuatro módulos pueden ser estudiados de forma independiente pero ninguno de ellos tiene sentido sin los tres restantes, de modo que el sistema no puede funcionar si alguno falta.

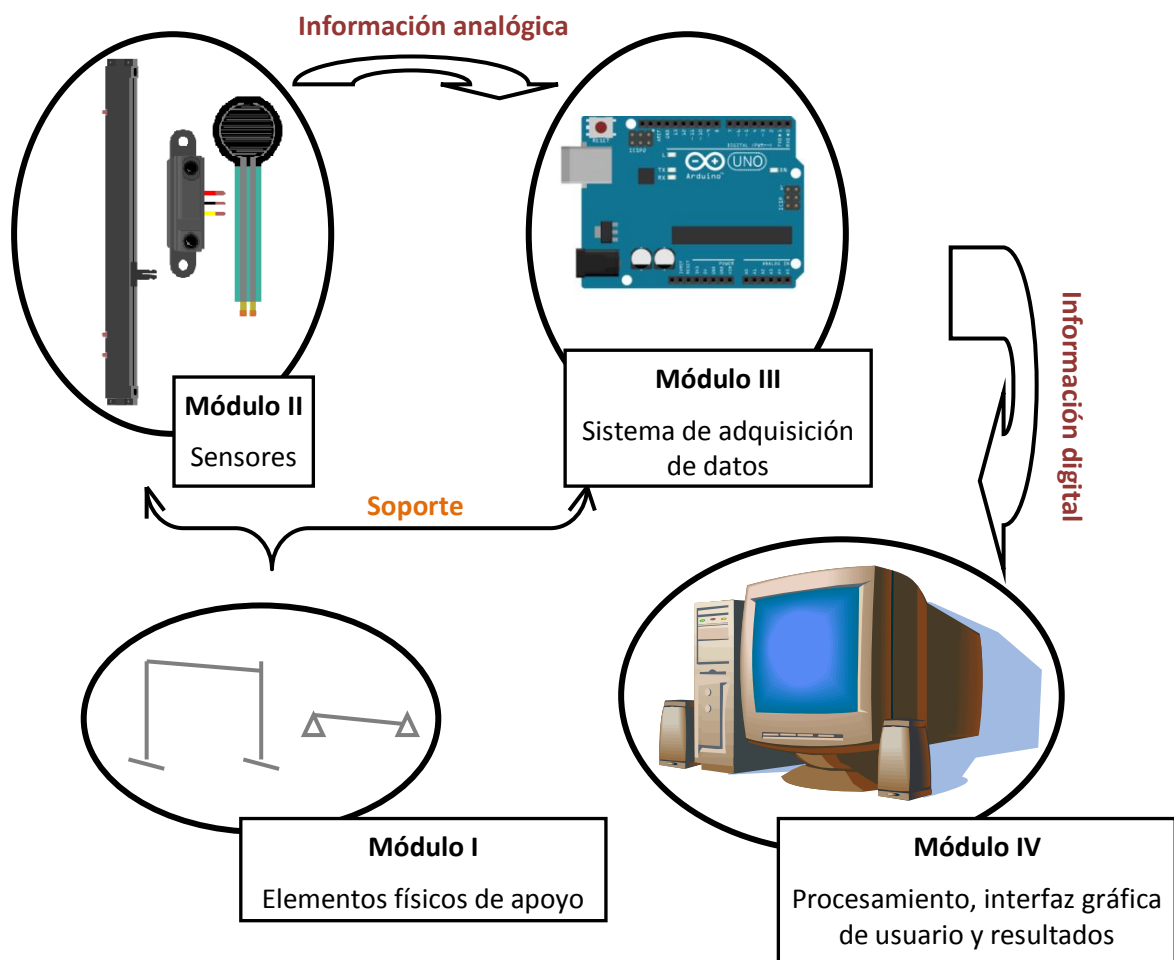


Fig. 12 Relación de los cuatro módulos del sistema

Elaboración propia

El primero de los módulos consiste en el modelo reducido de dos estructuras muy comunes en la construcción como son las vigas y los pórticos. Para el presente proyecto se han

empleado piezas metálicas que hacen las veces de columnas y de vigas, unidas mediante tornillos y tuercas también metálicos, pero siempre buscando formas que no sólo imiten a estructuras reales, sino que permitan ser modificadas según los deseos de los usuarios y, además, sean prácticas a la hora de montar en ellas el sistema de monitorización. Es preciso destacar que la forma también se ha concebido pensando en el hecho de que las cargas que se aplicarán sobre las estructuras serán causadas por una persona física, empleando la fuerza de sus propias manos. Por otro lado, las modificaciones que admiten los modelos varían según el tipo de estructura. La viga puede variar sus apoyos de simple a empotrado o dejar uno de ellos libre, admitiendo cualquier combinación de estos o incluso añadiendo un apoyo simple al punto medio de la luz, pasando a ser una viga de dos vanos. Esto se consigue con un sistema de tornillos y soportes que fijan la estructura de forma rápida y sencilla. Por su parte, el pórtico permite regular la altura de sus columnas, así como la altura de una ménsula intermedia que incluye el modelo para añadir un nuevo caso a estudiar, pero deja empotradas las bases y también son fijas las uniones viga-columna. Con todas estas posibles modificaciones se consigue dotar de más realismo a todo el montaje.

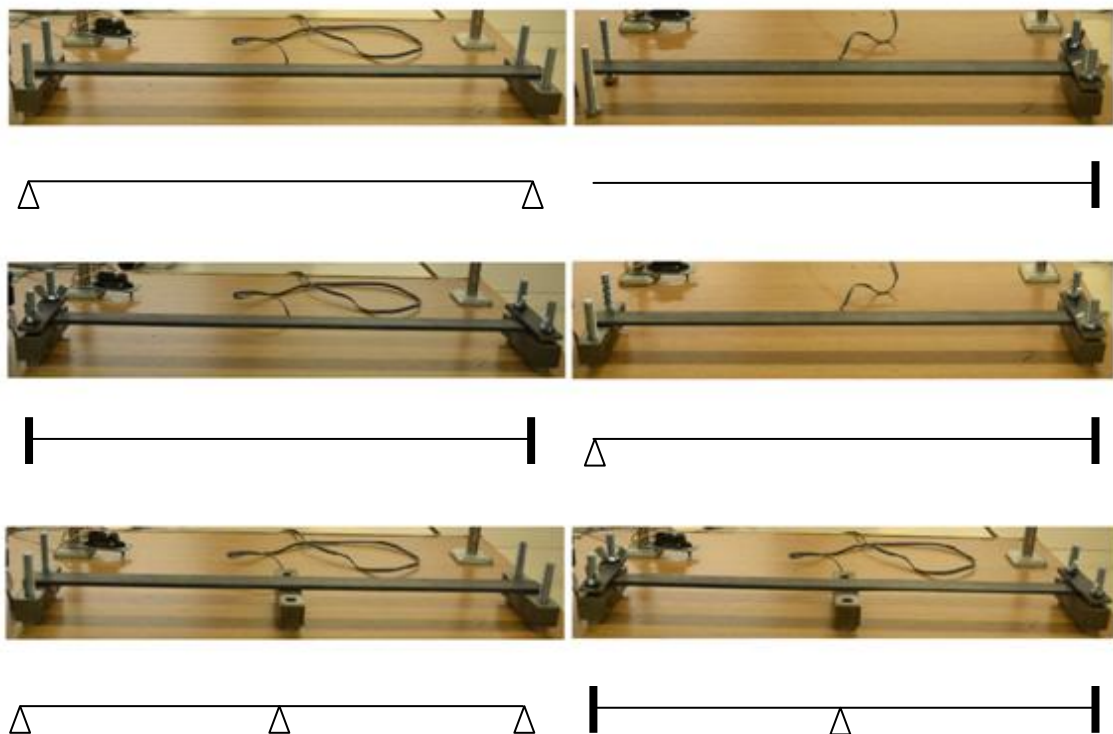


Fig. 13 Distintos casos del modelo de la viga según los apoyos y sus esquemas correspondientes

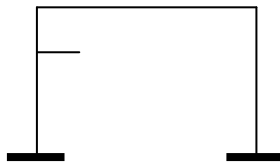
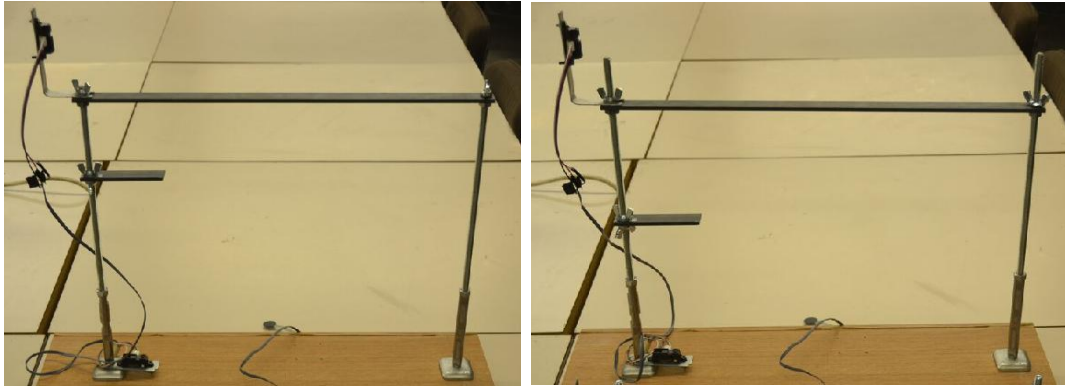


Fig. 14 Dos casos del modelo del pórtico según la altura de las columnas y la posición de la ménsula intermedia y el esquema que los representa

Añadido al modelo, en este módulo se deben incluir los soportes para los sensores que permiten el buen funcionamiento de estos. Este grupo de los soportes también cuenta con un objeto diseñado especialmente para mejorar el manejo del artefacto (Fig.15): un portador para el sensor de presión que además facilita la detección por parte del sensor de distancia (ambos dispositivos se explicarán más adelante), gracias a su superficie ampliada con respecto a la mano humana.

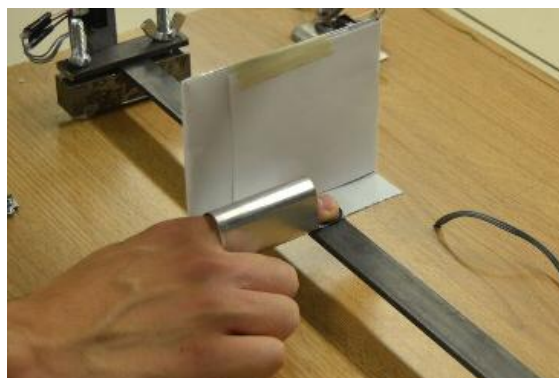


Fig. 15 Portador del sensor de fuerza con área ampliada para mejorar la detección

El segundo módulo es la red de sensores que permiten captar información relacionada con una carga puntual aplicada mediante el uso del objeto presentado anteriormente. Esta red consiste en tres sensores de distancia y otro sensor que permite registrar la fuerza que el dedo de una persona ejerce sobre la estructura. En el caso del sensor de fuerza es común para el pórtico y la viga, con lo que debe ser móvil, pero los sensores de distancia están fijos, ya que cada uno mide la distancia comprendida entre el punto donde se aplica la carga y un punto

predefinido de la estructura. De esta forma, encontramos un solo sensor de distancia en la viga, en uno de sus extremos, pero dos sensores en el pórtico. Con los dos sensores se permite controlar la posición de la fuerza cuando esta es aplicada en el dintel, situando uno de ellos en un extremo superior de forma similar al caso de la viga, o controlar la altura a la que se aplica la fuerza sobre una de las columnas, situando el otro sensor en una de las bases. Además, este sensor de la base es aprovechado para saber a qué altura se encuentra la ménsula intermedia, si se da el caso de que la fuerza se aplica en ella, requiriendo únicamente un cambio de posición del dispositivo realizado manualmente.

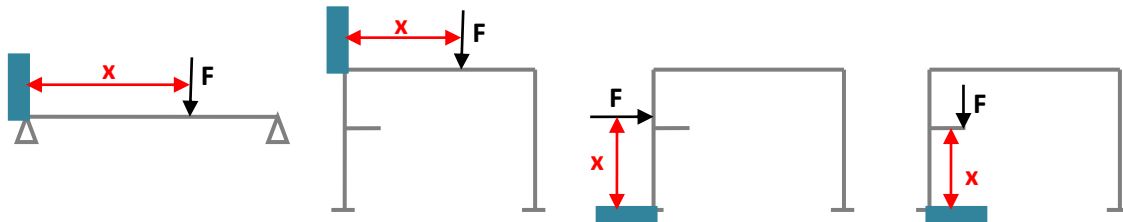


Fig. 16 Distancia x medida con los sensores (en azul) según donde se aplique la fuerza y según la estructura

Antes de seguir con el siguiente módulo se debe incluir dentro de la red de sensores otro dispositivo que pese a no ser un sensor per se cubre una función similar. Se trata de un potenciómetro que es empleado para introducir una variable más a la herramienta de análisis: el grado de giro en el punto medio de una viga simplemente apoyada. Esta variable será empleada para una sección basada en el análisis en régimen elástico, totalmente ajena al análisis de los modelos a escala. De todas formas, por lo que ahora mismo nos ocupa, se trata de una solución que permite introducir información al sistema de un dato físico de interés, como es la posición de una patilla movable a gusto del usuario, pero que simula otro dato con sentido estructural.

El tercer módulo es denominado sistema de adquisición de datos. Dicho de forma muy simple, se trata del elemento que permite reunir la información captada por la red de sensores de forma adecuada y transmitirla hasta el punto donde esta información será procesada. El dispositivo escogido para realizar esta función es una placa programable Arduino UNO, por su polivalencia y su eficiencia, al menos al nivel de este proyecto. Gracias a todos los sensores y a esta placa es posible transformar información analógica en digital, haciéndola comprensible para un ordenador.

Por último, el cuarto módulo tiene lugar en un ordenador, ya que requiere cierta capacidad de cálculo y un dispositivo de visualización como la pantalla de este. Se ha decidido desarrollar una aplicación a partir del *software* Processing capaz de trabajar con todos los inputs que se introduzcan en el sistema, ya sea de forma física provenientes de la placa Arduino o a través de la misma herramienta, y operar con ellos de forma correcta. Dicha aplicación incluye todas las fórmulas necesarias para realizar un análisis lineal de la viga o del pórtico tras aplicarle la carga puntual, y también incluye las fórmulas necesarias para estudiar una estructura hipotética sujeta a una variable introducida a través del potenciómetro pero en

régimen plástico. Hay que explicar que la aplicación no se trata únicamente de una caja negra donde se introducen unos datos y que extrae un resultado, sino más bien de un programa interactivo en el que van apareciendo una serie de menús donde es posible escoger qué se quiere estudiar e introducir variables requeridas por el programa, lo que es conocido como interfaz gráfica de usuario. Además, sea cual sea el camino escogido, al final siempre se llega a una pantalla definitiva de resultados, donde aparecen distintos esquemas representativos de parámetros estructurales de interés. Se debe destacar que las variables referentes a magnitudes físicas reales, las captadas por los sensores, están constantemente siendo actualizadas, de manera que el sistema trabaja con información prácticamente instantánea de lo que sucede en el modelo. Con esto se consigue introducir en el prototipo el concepto de análisis a tiempo real, cada vez más importante dentro de ámbito de la Monitorización de la Salud Estructural.

Como puede verse en las imágenes 17 y 18, todo el montaje funciona con comunicación a través de cables, un hecho que no implica ningún problema ya que se trabaja dentro del laboratorio y todos los elementos se encuentran próximos entre sí. Además, como solución práctica, se ha decidido montar tanto el modelo del pórtico, el de la viga y el potenciómetro en una misma base de madera. En esta base se han dispuesto unas patas que permiten elevarla y esconder debajo de ella tanto la placa Arduino como parte del cableado.

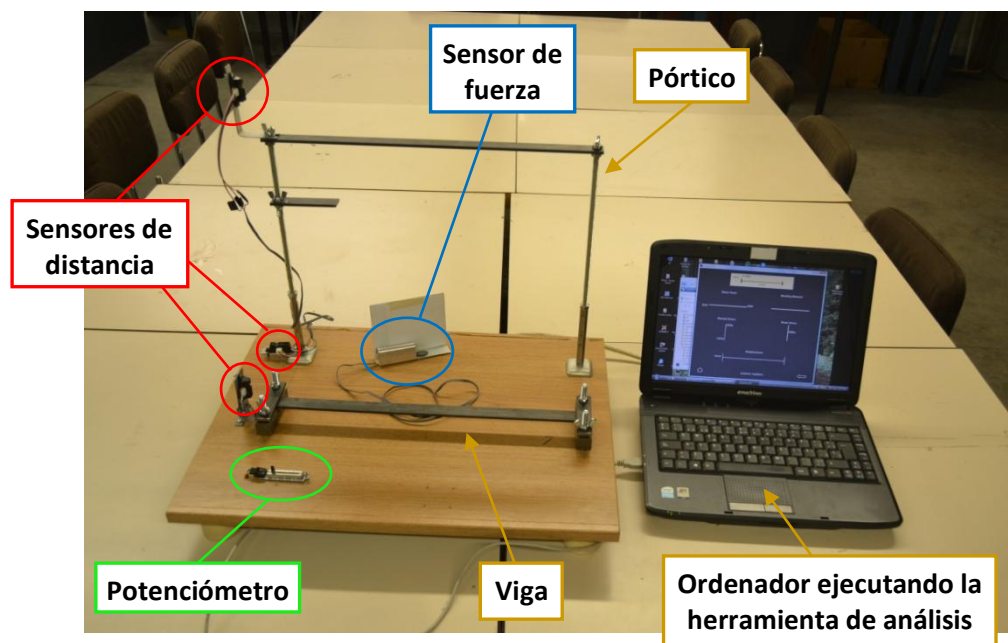


Fig. 17 Fotografía del artefacto completo conectado al ordenador

A continuación se presentan dos sub-apartados que intentan explicar de forma más exhaustiva algunos de los elementos que conforman todo el sistema. El primero de ellos se centra más en el módulo de sensores y en el sistema de adquisición de datos, mientras que el segundo hace referencia al tratamiento de los datos y a la interfaz gráfica de usuario, el cuarto módulo.

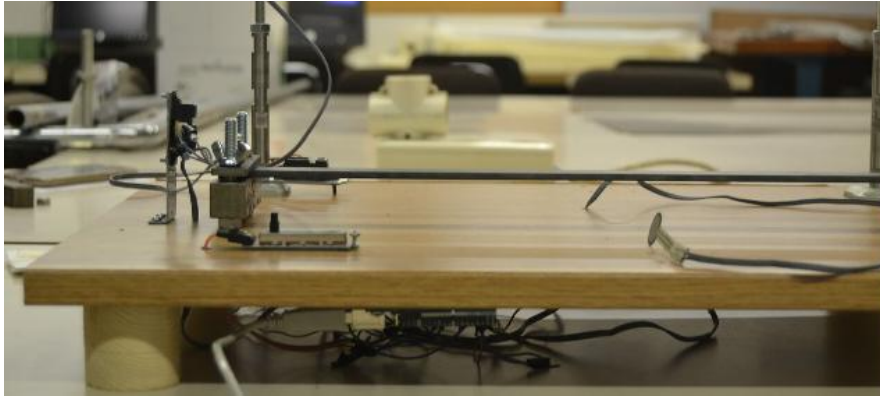


Fig. 18 Placa Arduino y cableado escondidos bajo todo el montaje

4.1. Medición de magnitudes y electrónica

Este subcapítulo del trabajo tiene como finalidad explicar de qué forma se captan los estímulos físicos necesarios para el funcionamiento de la herramienta desarrollada. Cada una de las distintas magnitudes analógicas que interesa conocer requerirán el uso de algún dispositivo concreto, dispositivos que utilizando tecnologías variadas son capaces de traducir esos estímulos en voltajes, en otras palabras, los hace comprensibles digitalmente. De todas formas, todos estos aparatos de medición tienen un punto de encuentro común: la placa Arduino.

La placa Arduino es el elemento fundamental de todo el sistema de medición que rodea el modelo físico. Como ya se ha dicho, en primera instancia es en ella donde se recoge toda la información adquirida, y también es esta placa desde donde se envían los valores medidos hasta el programa. Para comenzar, de forma más práctica y sin entrar a hablar otra vez de las ventajas del hardware libre, se puede definir el dispositivo Arduino como un ordenador en miniatura. De forma más precisa, se trata de un microcontrolador, descrito por la web de Electrónica Estudio [36] como un circuito electrónico que incluye todos los componentes necesarios para permitir grabar un programa, ejecutarlo y almacenar información, todo esto gracias a la unidad de procesamiento central y a las unidades de memoria, y además es capaz de comunicarse a través de puertos de entrada y de salida.

La figura 19 muestra el hardware de Arduino más sencillo, Arduino UNO, que es el empleado para la realización de este proyecto. Para el trabajo, y para llevar a cabo cualquier otra idea, lo que realmente interesa de esta plataforma es la manera de interactuar con el entorno y con el ordenador central, con lo que la placa cuenta con varios pines y conexiones. Una buena descripción que se ha seguido de estos elementos se encuentra en uno de los artículos disponibles en Treegic [37].

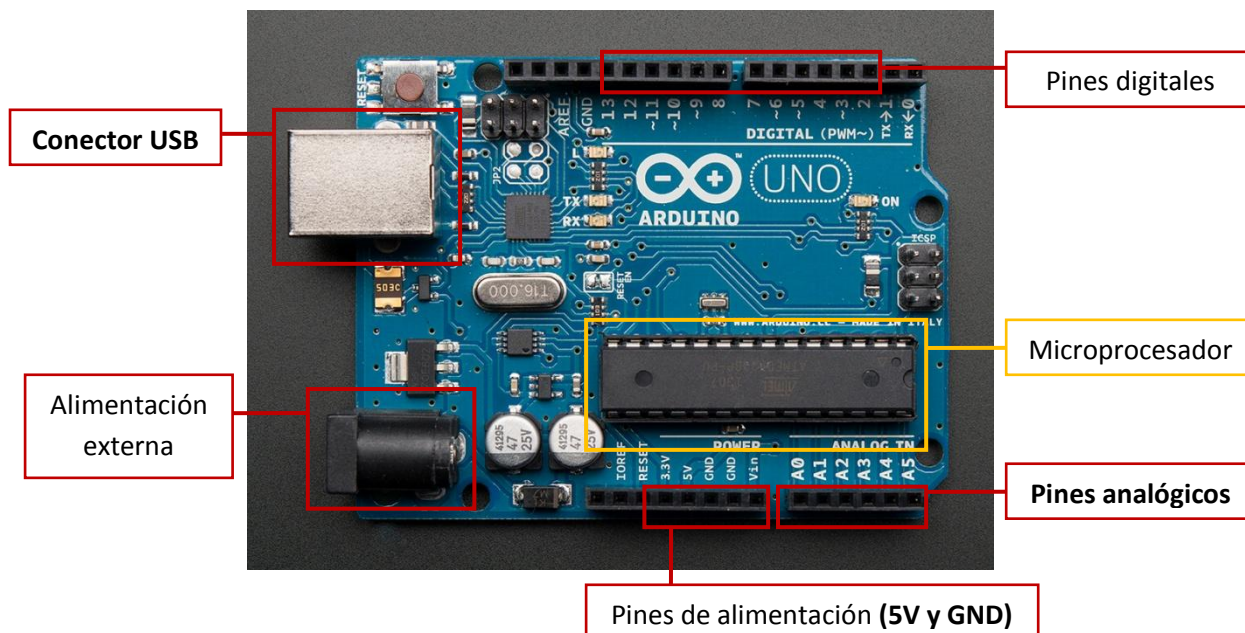


Fig. 19 Componentes principales de la placa Arduino: marcadas en rojo las conexiones externas, en negrita las usadas en el trabajo

Fotografía de www.prometec.net [38] y elaboración propia

La primera conexión a destacar es la que permite comunicación con el ordenador mediante un cable USB. Gracias a un software propio de la empresa Arduino y en un lenguaje comprensible por el usuario, se puede escribir el código que contiene las órdenes que el sistema debe ejecutar. Estas órdenes pueden ser simplemente leer y transmitir la información procedente de sensores, como es el caso del presente trabajo, pero también pueden abarcar muchas otras acciones, desde encender un simple LED hasta enviar un correo electrónico en respuesta a algún estímulo. Sea cual sea el código que se quiera insertar para programar la placa, utilizando el software proporcionado siempre será necesario verificar que nuestro programa no contiene errores y, si ese es el caso, ya se puede compilar, o lo que es lo mismo, traducir el código a un lenguaje comprensible para la máquina. Por último, a través del conector USB se puede cargar al microprocesador el programa creado, de forma que Arduino puede correr el código sin necesidad de mandarle las órdenes continuamente. Esta misma conexión USB se utilizará también como vía para transmitir al ordenador, de forma continua, la información captada por el sistema de medición. Para acabar con este elemento, una última función que puede cumplir es la de alimentar el sistema, ya que puede servir como entrada del voltaje necesario para el funcionamiento de la placa. Si por la razón que fuese se requiriera que el microcontrolador trabajase sin conexión constante a un ordenador, no es el caso de este proyecto, sería posible alimentar el sistema utilizando baterías conectadas a una entrada alternativa a la USB.

Seguidamente, otra conexión a destacar son los pines de alimentación, dicho de otro modo, clavijas que tienen como finalidad alimentar los dispositivos que acompañan a la placa Arduino en los distintos proyectos. Estos pines cuentan con dos salidas de tierra, donde deben morir todos los circuitos, y con tres entradas de voltaje. El pin de alimentación que se utiliza en

este trabajo para alimentar a los sensores y al potenciómetro es el de 5 voltios, un pin que suministra constantemente ese voltaje, sin importar la alimentación de la placa. A parte de este, también existe otro pin que funciona prácticamente igual al de 5 V pero suministrando 3.3 voltios y, por último, otra clavija que aporta en cada momento el mismo voltaje que entra por la alimentación.

Aunque no se utilicen en el presente prototipo, también hay que exponer los pines digitales. Estos pines se pueden definir desde el programa cargado a la placa como entradas o como salidas, según la función que deban cumplir, y lo que leen (o transmiten) es si llega (o sale) voltaje o no, de forma que pueden entender únicamente dos estados: 0 o 5 voltios. Una forma corriente de trabajar con ellos es mediante pulsos de encendido y apagado que pueden entenderse como un sistema de comunicación.

La última conexión de que dispone Arduino UNO son los pines de entrada analógicos. Debido a su naturaleza, estas clavijas sí que son usadas en el proceso de medición de magnitudes del modelo físico, así que son la puerta de entrada para los valores captados. Los pines analógicos son capaces de transmitir datos que van más allá de la entrada o no entrada de voltaje, como ocurre con los digitales, pudiendo entender voltajes comprendidos entre los extremos 0 V y 5 V. La forma en que se expresa esta información es con valores que oscilan entre el 0, cuando no entra ningún voltaje por ese pin, y el 1023, cuando entra el voltaje máximo de 5 V. Todo esto hace posible correlacionar un voltaje con una magnitud física concreta, siempre que se conozca de donde proviene la medida, lo que se aprovecha en este trabajo con los distintos elementos que se presentan a continuación. Hay que tener siempre presente que este modelo sólo dispone de 6 pines analógico, con lo que no es posible conectar más de 6 dispositivos que trabajen de este modo.

4.1.1. Dispositivos empleados

Como ya se ha dicho, la plataforma Arduino hace de nexo de todos los aparatos que permiten analizar lo que ocurre en el mundo físico, de manera que dependiendo de los dispositivos que se añadan al prototipo se conseguirán funciones muy variadas. Dicho de otra forma, los dispositivos empleados son los que marcarán la utilidad de cada sistema, y no la propia placa. Así pues, es muy importante también explicar cuáles son estos aparatos y cuál es su funcionamiento.

Antes de nada, el esquema de la figura 20 presenta la conexión de todos los dispositivos con la placa tal y como se utiliza en el prototipo de este trabajo. Cabe destacar que este esquema se ha elaborado con el programa Fritzing, muy útil para dibujar circuitos y prototipos.

Los datos que se necesitan se obtienen mediante dos tipos de sensores: de distancia (3) y de fuerza, y también gracias a un potenciómetro, todos ellos mostrados en la misma figura 20.

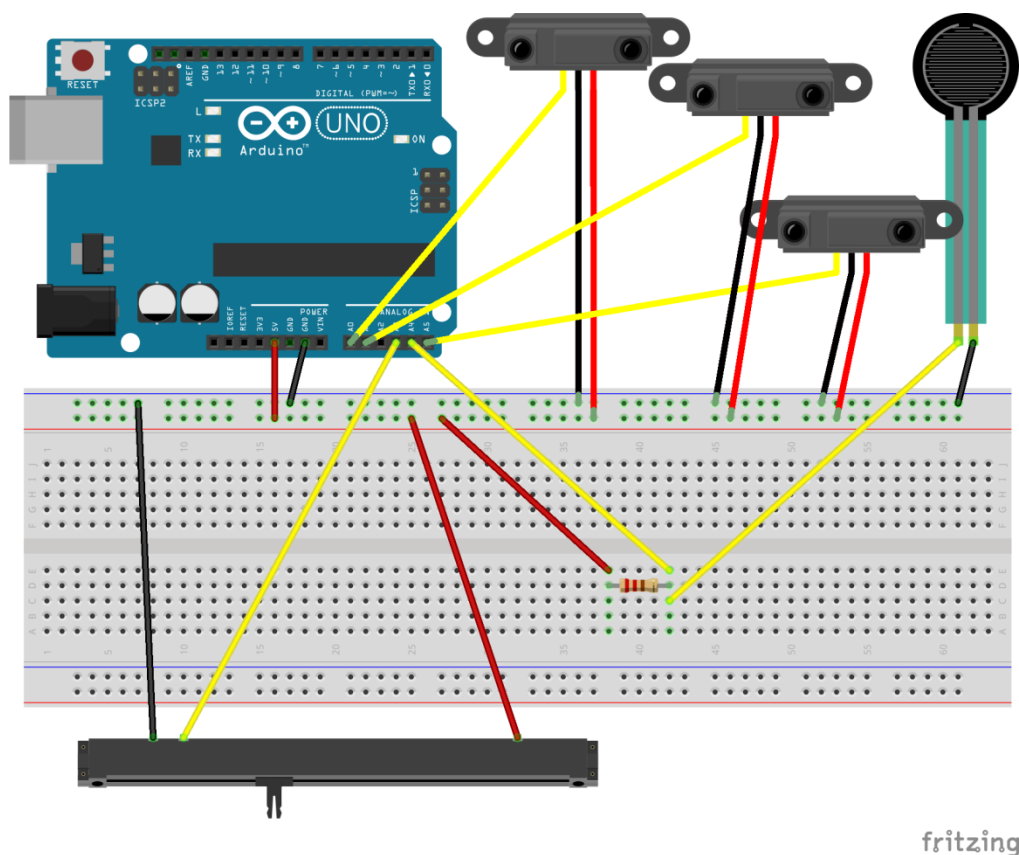


Fig. 20 Esquema Arduino, sensores y potenciómetro

- **Sensor de distancia**

La herramienta que se ha desarrollado requiere conocer, para algunas de sus funciones, la distancia a la que se aplica una fuerza. Concretamente, cuando se estudien vigas será necesario saber a qué distancia del apoyo se está ejerciendo una fuerza vertical, mientras que en el caso de estudiar un pórtico se puede requerir tanto la distancia en la viga, cuando se aplica una fuerza vertical en ella, como la distancia entre la base y el punto en el que se aplica una fuerza horizontal en una columna o una fuerza vertical en un voladizo (el siguiente capítulo muestra los distintos casos con más detalle).

Sea cual sea la distancia a medir, el método empleado siempre será el mismo, aunque debido al amplio abanico de tecnologías existentes hoy en día se podría haber escogido otro dispositivo. El sensor de distancia utilizado funciona con tecnología infrarroja, un tipo de sensor que pese a no ser muy utilizado en SHM sí que resulta muy útil en este trabajo, debido a su precio económico y a que cumple unos mínimos de precisión que no son muy exigentes.

En la página Wiki de Robótica [39] puede verse que los sensores infrarrojos funcionan con un emisor de este tipo de luz, no apreciable por el ojo humano, y un receptor fotosensible. El emisor es un LED que envía un haz de luz infrarroja, el cual tras rebotar en una superficie situada frente al sensor es captado por el receptor con un cierto ángulo, de forma que contra más lejos esté el objeto más pequeño será el ángulo. El receptor es capaz de saber este ángulo gracias a una película lineal fotosensible, y dependiendo de él dará una respuesta analógica

entre 0 y 1023. Hay que tener en cuenta que el objeto a medir debe estar situado justamente frente al LED emisor, y que la distancias no pueden ser muy elevadas, ya que en ese caso los ángulos de recepción son muy parecidos. La triangulación llevada a cabo por el dispositivo se muestra en el esquema de la figura 21:

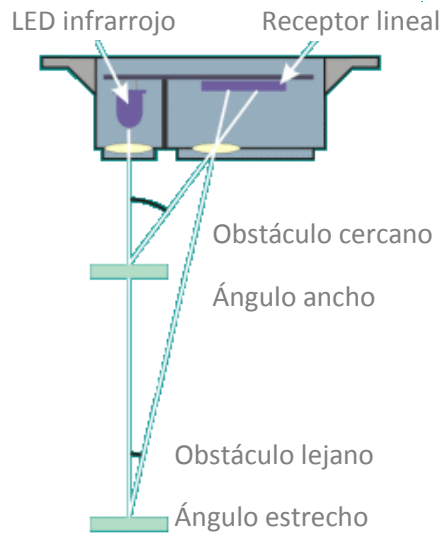


Fig. 21 Triangulación del sensor de distancia

<http://wiki.robotica.webs.upv.es/> [39]

Cada uno de estos sensores tiene un rango de actuación y unas respuestas específicas. Por tanto, para entender los valores enviados por el dispositivo es preciso conocer la ficha técnica provista por cada fabricante. En concreto, en este trabajo se usa un modelo Sharp 2Y0A21, adecuado para distancias mayores a 5 cm e inferiores a 80 cm aproximadamente, lo que es suficiente teniendo en cuenta las magnitudes del modelo físico a escala. Pese a que el sensor únicamente dará un valor entre 0 y 1023, es posible pasar de esta cifra conocida a una distancia, que es el objetivo final de esta clase de sensores. Existen dos formas de calcular la distancia: haciendo uso de la ficha técnica o experimentalmente, pero sea cual sea la opción escogida se deberán introducir en el código abierto de Arduino las líneas oportunas. Si se analiza la ficha técnica se puede extraer la siguiente gráfica de la figura 22, una relación entre el voltaje y la distancia a la que se encuentra el objeto que refleja la luz infrarroja:

Se puede apreciar que las medidas menores a 5 cm aproximadamente no son fiables, y que a partir de este valor el voltaje disminuye a medida que el objeto se aleja. A partir del gráfico, para los valores situados entre el rango de 5 cm a 80 cm se puede ajustar una función que para cada voltaje medido aporte la distancia, una función que puede venir dada o que habrá que aproximarla. El problema ahora es pasar del valor que sale del sensor a un voltaje, una tarea simple sabiendo que la cifra 1023 corresponde a 5 V y la cifra 0 corresponde a un voltaje nulo, interpolando cualquier valor intermedio.

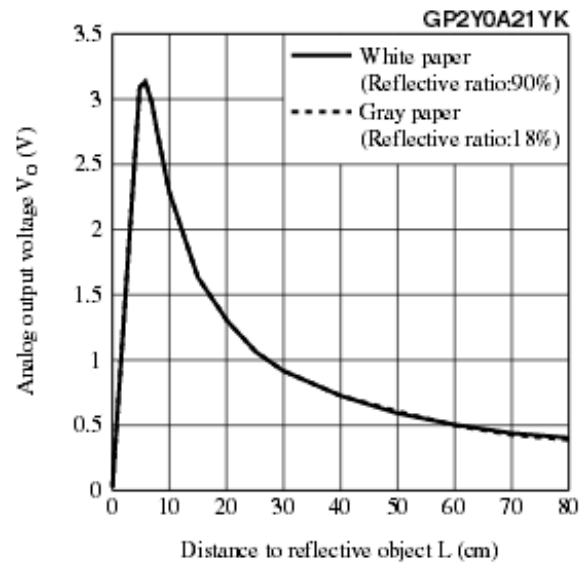


Fig. 22 Gráfica Voltaje de salida analógico vs Distancia hasta el objeto
Ficha técnica del sensor

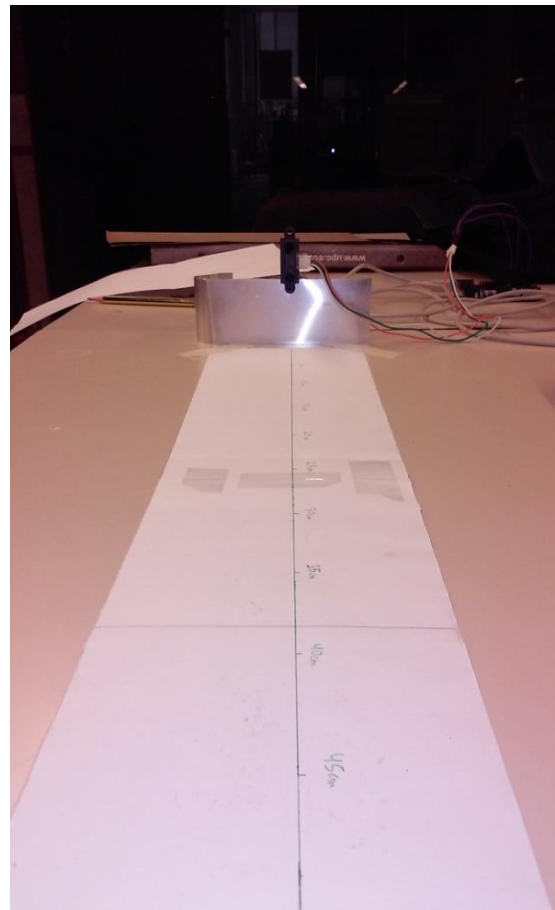
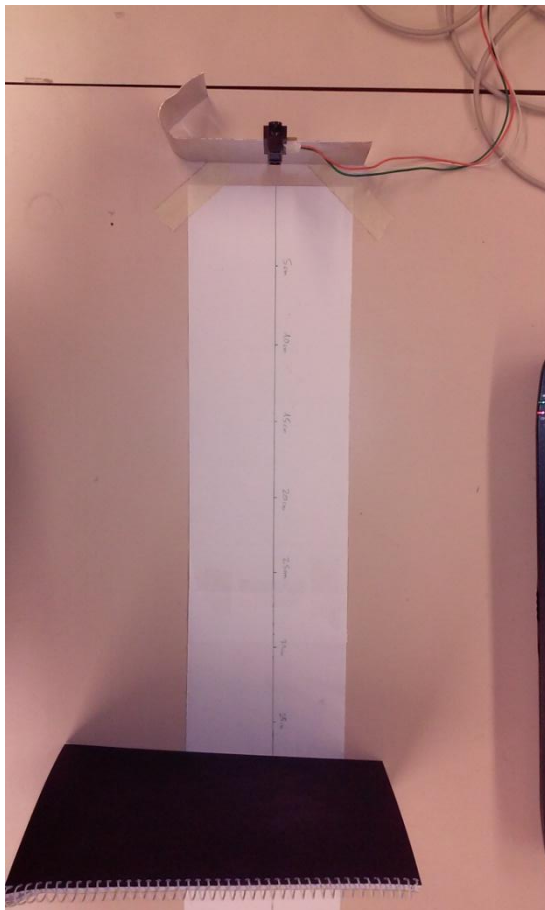


Fig. 23 Montaje para la calibración del sensor de distancia

De todas formas, el método que se ha optado por emplear es el experimental, es decir, calibrar el sensor manualmente, ya que es muy posible que la curva dada por el fabricante no se siga siempre perfectamente. Lo que se hace en este caso es preparar el sensor y la placa, programada solamente para recibir información de este dispositivo, y situar el montaje sobre una zona con las distancias marcadas (más puntos cuando se requiere mucha precisión y menos cuando lo que se requiere es conocer una situación aproximada, como es este caso). Cuando se ejecuta el programa sólo queda situar repetidamente un objeto en cada distancia que se quiere conocer y apuntar el valor que recibe Arduino, descartando siempre las distancias más pequeñas. Finalmente, se pueden definir intervalos de valores entre los cuales se encuentra una distancia concreta, alcanzando el objetivo del sensor. Se puede observar el montaje expuesto en la figura 23.

Por último, como se puede ver en el esquema del circuito, este sensor cuenta con tres patas: una de alimentación de 5 V, una de tierra y una de salida hacia un pin analógico. Todas ellas se conectarán directamente con la placa Arduino.

- **Sensor de fuerza**

La siguiente magnitud necesaria para el funcionamiento de la aplicación es la fuerza actuante sobre una estructura, sea una viga o un pórtico, ya que es la causante de todo lo que sucede en ella. Para medir esta fuerza se ha optado por usar un dispositivo conocido como sensor de fuerza (o de presión) resistivo. Antes de nada hay que destacar que esta clase de sensores se utilizan principalmente como control táctil en algunos aparatos electrónicos, ya que no son capaces de tomar medidas muy precisas pero si detectan de forma muy fiable si existe una presión. Este hecho hace que en casos de monitorización real no se utilicen, pero para este proyecto cumplen su función sobradamente. Lo que se busca en este trabajo es simular una fuerza aplicada por el usuario con un dedo sobre el modelo, por lo que más que querer saber exactamente cuál es la magnitud de esa fuerza interesa tener una idea de la intensidad, si es baja, alta o media, y así poder comparar los distintos resultados.

Este tipo de sensores, cuya descripción puede encontrarse en la página comercial de la empresa Teslabem [40], están formados por tres capas (Fig.24): una base que cuenta con la pata de entrada, la de salida y la cabeza con electrodos, una capa intermedia que une las otras dos pero dejando una separación requerida y una última capa cubierta con un material semiconductor. Este montaje consigue que al incrementar la presión ejercida la resistencia eléctrica ofrecida disminuya. De esta forma, Arduino recibirá un valor máximo de 1023 cuando la resistencia sea mínima, es decir, cuando se aplique mucha presión, mientras que si no se ejerce ninguna presión la placa leerá un valor de 0, ya que la resistencia será máxima.

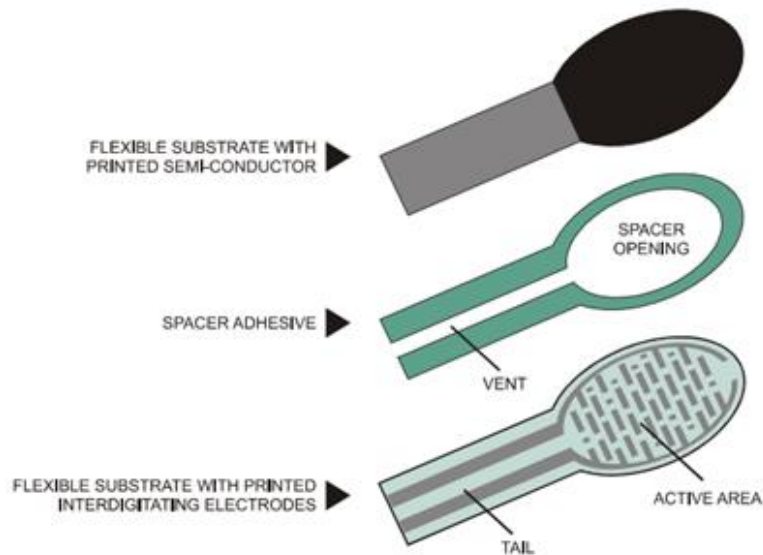


Fig. 24 Partes de un sensor de fuerza resistivo

<https://teslabem.com> [40]

Normalmente se trabaja en el intervalo comprendido entre 100 g y 10 kg, y existen fichas técnicas de estos productos donde se puede encontrar la relación entre la resistencia y la fuerza. De todas maneras, sabiendo que la precisión no es una característica a destacar, y teniendo como objetivo simular una fuerza, se ha decidido no calibrar el sensor con fuerzas reales y pasar directamente de los valores leídos a un rango de fuerzas que interesen. Para concretar, y como se verá más adelante, el modelo representará estructuras con longitudes del orden de metros, con lo que una fuerza máxima de 20 kN podría ser aceptable. En definitiva, lo que se hace es interpolar linealmente cualquier valor leído entre 0 y 1023 con fuerzas entre 0 kN y 20 kN.

Para acabar con el sensor de fuerza hay que hablar de su conexión con Arduino gracias a sus dos patas. Como muestra el esquema inicial, una pata va directamente a tierra, mientras que la otra se tiene que dividir. Esta segunda pata se bifurca en dos conexiones: una directa a un pin analógico, para transmitir la información, y la otra llega hasta la alimentación, pero para mejorar la lectura del sensor es preciso incluir una resistencia antes del pin de 5 V, que en este caso es de 220 Ω .

- Potenciómetro

Este dispositivo no se empleará para medir una magnitud concreta en un modelo físico, como eran la fuerza y la distancia, sino como un sistema para introducir una variable manualmente: el ángulo que debe girar el punto central de una viga bajo la acción de una fuerza, utilizado en el apartado de análisis plástico de la aplicación.

Para entender cómo funciona un potenciómetro hay que pensar que se trata de una resistencia que puede variar según se desee, como se afirma en la web Área Tecnología [41]. Esta variabilidad se logra mediante un hilo conductor, que es la propia resistencia, con un extremo que es fijo pero el otro puede moverse por el hilo, de forma que la longitud a recorrer es también variable. El caso concreto de este proyecto trabaja con un potenciómetro lineal, es decir, con el terminal variable que se desplaza en línea recta. Además, el extremo movable de este modelo se debe desplazar manualmente con la ayuda de un saliente.

El fabricante de cada potenciómetro debe indicar la resistencia característica máxima, con lo que utilizando la ficha técnica o calibrando manualmente es posible conocer la resistencia que ofrecerá cada posición del electrodo variable. De cualquier manera, lo que aquí se busca es poder transmitir un valor analógico manualmente al programa, uno que cambie en función de la voluntad del usuario, así que no hay que tener en cuenta ni la resistencia ni cómo esta varía. Sabiendo todo esto, se debe asignar el ángulo 0 rad a una de las posiciones extremas del potenciómetro y el ángulo máximo deseado al otro extremo, teniendo siempre en cuenta que los extremos máximos corresponden, de nuevo, a los valores 0 y 1023. Lo que se consigue con todo esto es crear un dispositivo que le permite al usuario introducir un input que no tiene nada que ver con la magnitud medida.

En cuanto a las conexiones con la placa no hay más complicación que una pata que llega hasta el pin de 5 V de Arduino, otra que llega al pin de tierra y una última que transmite un valor de 0 a 1023 por un pin analógico.

4.1.2. Programa de Arduino

El software que ofrece de manera gratuita la compañía *Arduino* ha permitido escribir el código a cargar en la placa, cuyo texto se desglosará y explicará en este sub-apartado. Dicho código garantizará la transmisión de la información captada al ordenador y permitirá que el sistema funcione de forma autónoma.

Para comenzar es preciso declarar las variables que se emplearán durante la ejecución del programa. Como se puede ver en el siguiente fragmento, se utilizan distintas variables definidas como números enteros para cada sensor y para el potenciómetro. Cabe destacar aquellas variables que además de ser declaradas se definen como A0, A1, A2, A3 o A4, ya que lo que esto significa es que estamos dándole otro nombre, uno con sentido que podamos identificar fácilmente, a los pines por donde entra la señal de cada dispositivo.

```
//SENSOR DISTANCIA
int sensor_dist_1=A1;
//pin A1
int lectura_dist_1;
int X_1;
int valor1_1;
int valor2_1;

int sensor_dist_2=A2;
//pin A2

int lectura_dist_2;
int X_2;
int valor1_2;
int valor2_2;

int sensor_dist_3=A3;
//pin A3
int lectura_dist_3;
int X_3;
int valor1_3;
int valor2_3;
```

```

//SENSOR FUERZA
int sensor_fuerza=A4;
//pin A4
int lectura_fuerza_1;
int lectura_fuerza_2;
int fuerza;
int F;

//POTENCIOMETRO
int potenciometro = A0;
//pin A0
int pot;
int posicion; //posicion
en %
int valor_pot_1;
int valor_pot_2;
int diferencia_pot;

```

Declaración de variables en el código

A continuación se define la función *setup()*, una función que sólo se ejecuta una vez al empezar a trabajar la placa y que en este caso permite abrir el puerto serie, es decir, permite configurar el elemento a través del cual se transmitirán datos digitales (para este trabajo se trata de una entrada USB). La forma de especificar este puerto serie es mediante la sub-función *Serial.begin()*, la cual no solamente abre el puerto sino que permite definir la velocidad a la que se comunica con el ordenador. En este caso se ha decidido utilizar una velocidad de transmisión de información de 9600 bits por segundo, una opción muy común.

```

void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

```

Función setup()

Las líneas del código que contienen las instrucciones más importantes, aquellas que se repetirán constantemente, son las incluidas en la función *loop()*. Todo lo que se encuentre en esta parte del código se ejecutará cíclicamente, de tal forma que permite responder a cambios en los estímulos externos recibidos. En consecuencia, todo lo referente a los sensores y al potenciómetro debe ser escrito dentro de esta función. Antes de nada, hay que presentar la sub-función que permite leer la entrada analógica (valores entre 0 y 1023) de los pines que nos interesan: la construcción *analogRead(pin)*, donde el pin entre paréntesis será el que se desee en cada ocasión.

Para los tres sensores de distancia se introducirán las mismas instrucciones pero con distintas variables para diferenciar los resultados de cada dispositivo. Lo primero que se hace es definir las variables llamadas *valor1* y *valor2*, de modo que en cada ciclo de repetición del código una sea igual a la lectura actual del sensor y la otra sea igual a la lectura del ciclo anterior. Estas dos variables ayudarán a filtrar aquellas lecturas que aparecen ocasionalmente y que son muy distintas de las que se espera obtener, unas lecturas que reducirían la fiabilidad de los resultados y que es necesario descartar. Para ello, lo que se hace es restar los valores de ambas variables y si la diferencia es menor que un umbral escogido, en este caso es 3, se procede con las siguientes líneas, en caso contrario el resultado será el mismo que en el ciclo anterior. Por último, y si se da el caso de que la diferencia entra dentro del umbral establecido, se asignará un valor distinto a la variable resultado X según en qué intervalo se encuentre el valor de la lectura. Debido a la precisión de estos sensores infrarrojos se ha optado por dar

resultados de distancia cada 5 cm, suficientes para mostrar ejemplos variados. Además, hay que explicar que las lecturas de cada sensor varían para distancias iguales, así que será necesario calibrar cada uno por separado para definir los rangos adecuados.

```
void loop() {  
  
  //SENSOR DISTANCIA 1  
  
  valor1_1 = lectura_dist_1;  
  lectura_dist_1 = analogRead (sensor_dist_1);  
  valor2_1=lectura_dist_1;  
  
  int diferencia_1 = abs(valor2_1 - valor1_1);  
  
  if(diferencia_1<3){  
  
    if(lectura_dist_1>=527){  
      X_1=50;  
    }  
    if((lectura_dist_1>=340)&&(lectura_dist_1<526)){  
      X_1=100;  
    }  
    if((lectura_dist_1>=260)&&(lectura_dist_1<=339)){  
      X_1=150;  
    }  
    if((lectura_dist_1>=210)&&(lectura_dist_1<=259)){  
      X_1=200;  
    }  
    if((lectura_dist_1>=180)&&(lectura_dist_1<=209)){  
      X_1=250;  
    }  
    if((lectura_dist_1>=155)&&(lectura_dist_1<=179)){  
      X_1=300;  
    }  
    if((lectura_dist_1>=120)&&(lectura_dist_1<=154)){  
      X_1=350;  
    }  
    if(lectura_dist_1<=119){  
      X_1=0;  
    }  
  }  
}
```

Función loop() y tratamiento de los datos de un sensor de distancia

La siguiente parte del código, también incluida en la función *loop()*, hace referencia al sensor de fuerza. Primero se define la variable *fuerza* como la lectura del pin al que se conecta este sensor, y seguidamente se hace un mapeo del valor obtenido. Dicho mapeo consiste en transformar el valor de la lectura, que se encuentra entre 0 y 1023, a un valor entre 20 y 0, que es el rango de fuerza en kilonewtons que interesa obtener. En realidad, haciendo pruebas sobre el sensor se ha podido ver que el valor mínimo que este ofrece, cuando se aplica una presión relativamente alta, es de 160, con lo que el rango real de lecturas debe ir de 160 a 1023. El mapeo ofrece directamente el resultado *F* que se utilizará en la aplicación, pero se han detectado fluctuaciones de 0 a 1 cuando no se aplica ninguna fuerza. Para evitar confusiones se ha tomado la decisión de suprimir los resultados iguales a 1 asignando siempre el valor 0.

```
//SENSOR FUERZA

fuerza = analogRead (sensor_fuerza);

F = map(fuerza,160,1023,20,0);
if (F==1) {
    F=0;
}
```

Tratamiento de los datos del sensor de fuerza

Dentro del *loop()* también se encuentra una parte dedicada al potenciómetro. Para descartar los valores anómalos que en ocasiones ofrece este dispositivo se ha procedido de la misma manera que con el sensor de distancia: definiendo dos variables que al compararlas permiten decidir si el nuevo valor es extraño en relación al anterior. En este caso, si la diferencia es menor que 2, un umbral más exigente que anteriormente, el programa realiza un mapeo entre 0 y 1023, los valores que se obtienen al situar la pata deslizante del potenciómetro en los extremos, y transforma el valor leído en uno comprendido entre 314 y 0, un intervalo totalmente arbitrario que se ha escogido para representar el ángulo de giro del centro de una viga, entendido como 10^{-6} rad.

```
//POTENCIOMETRO

valor_pot_1 = pot;
pot= analogRead (potenciometro);
valor_pot_2=pot;

int diferencia_pot = abs(valor_pot_2 - valor_pot_1);

if(diferencia_pot<2){
    posicion = map(pot, 0, 1023, 314, 0);
    // convertir a angulo [(0-314)*10^-6 RAD]
}
```

Tratamiento de los datos del potenciómetro

Una vez tratados todos los valores recibidos por la placa para obtener dimensiones con las que se puede trabajar sólo queda enviar los resultados por el puerto serie. Se empleará la instrucción *Serial.Print()*, que permite enviar tanto variables como texto. Lo que se hace es enviar todos los valores separados por comas, incluyendo una al principio y otra al final, y se finaliza cada serie con un punto. Esto tiene como finalidad facilitar la separación de los datos cuando sea preciso. Por parte del ordenador, durante cada ciclo se recibe una cadena de datos tal que así: “*F,posición,X_1,X_2,X_3,*”, donde cada variable es un valor concreto.

Finalmente, se incluye un *delay(100)*, lo que equivale a decir que se detiene el programa durante una décima parte de segundo.

```
Serial.print(",");
Serial.print(F);
Serial.print(",");
```



```

Serial.print(posicion);
Serial.print(",");
Serial.print(X_1);
Serial.print(",");
Serial.print(X_2);
Serial.print(",");
Serial.print(X_3);
Serial.print(",");
Serial.print(".");

delay(100);

}

```

Envío de los resultados por el puerto serie

4.2. Interfaz de usuario: cómo funciona la herramienta

En este apartado se tratará de describir la aplicación que se ha desarrollado para este proyecto y que permite la visualización de resultados digitales en respuesta a unos inputs físicos. Gracias a la placa Arduino, a los sensores de carga y de distancia y al potenciómetro conocemos las magnitudes analógicas que son de interés para el análisis que se pretende llevar a cabo, pero estos valores en sí mismos no se visualizan (se tendría una lista de ellos). Lo que se pretende es procesar los resultados de las mediciones de tal forma que se pueda obtener una respuesta en forma de parámetros estructurales, útiles a la hora de entender qué está sucediendo en nuestro elemento de estudio y, a poder ser, de forma visualmente atractiva y fácilmente comprensible.

La herramienta que se ha creado con el fin de lograr lo expuesto en el párrafo anterior está desarrollada con el programa *Processing*, un *software* de programación visual basado en Java. Este *software* permite, de forma relativamente sencilla, incluir en el código y a modo de variables los valores obtenidos en las mediciones, así como dibujar prácticamente casi cualquier geometría en función de los inputs que se introduzcan en cada momento. De esta forma, también entra en juego un concepto muy interesante y novedoso en el análisis de estructuras: la respuesta en tiempo real.

4.2.1. Herramienta desarrollada

El uso del presente instrumento de análisis requiere una conexión a la placa Arduino que lo alimente de datos, pero también precisa de otros inputs que, como se irá explicando a continuación, habrá que ir seleccionando a través de una serie de menús y únicamente con el uso del cursor de nuestro ordenador. Se puede destacar que no será necesario en ningún caso insertar valores a través del teclado. El esquema de la figura 25 muestra de forma muy básica el proceso que se sigue para incorporar toda la información requerida dentro del programa para poder visualizar al final unos resultados. Cabría decir que mientras los datos que llegan de la placa son actualizados constantemente, reproduciendo los cambios que ocurren en la realidad, los que se ingresan desde la interfaz gráfica de usuario serán constantes para cada caso de estudio.

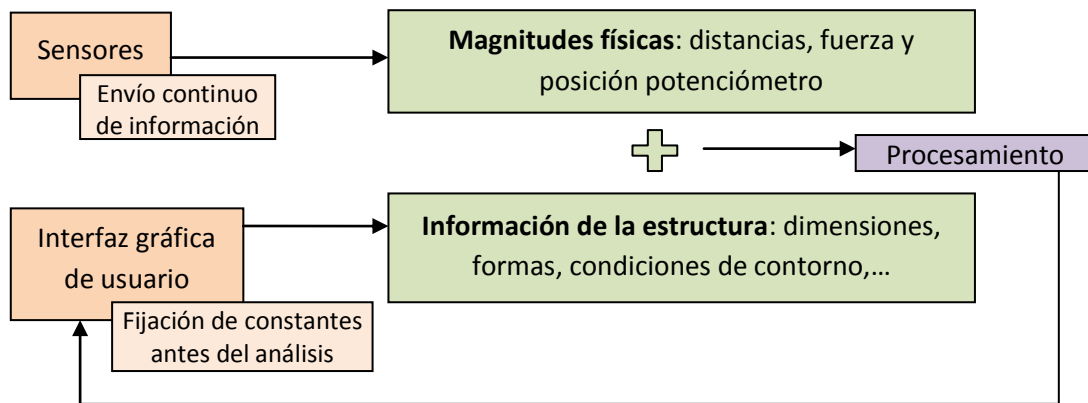


Fig. 25 Información que se ingresa en el programa, procedencia de esta y destino tras el procesamiento

Para empezar, la primera pantalla que aparece cuando se inicializa la aplicación es un menú con dos opciones: análisis elástico y análisis plástico. Estas dos posibilidades marcarán el tipo de experimento que se llevará a cabo a partir del momento en que se seleccione una de ellas, ya que cada opción trabaja con distintas ideas y metodologías. Para decantarse por una u otra sólo es preciso situar el cursor dentro del recuadro adecuado, el cual se oscurecerá ligeramente, y clicar con el botón izquierdo.

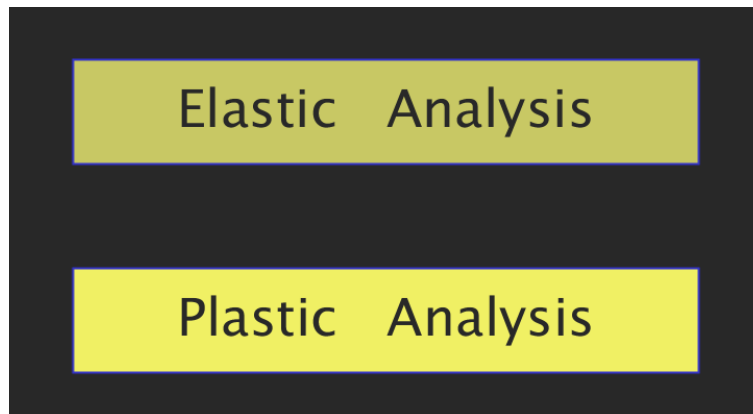


Fig. 26 Botones para seleccionar el tipo de análisis, el primero de ellos a punto de ser escogido

Antes de entrar en detalle con cada una de las modalidades de análisis es preciso comentar un aspecto práctico de la herramienta: conforme pasamos la primera pantalla siempre aparecerán dos iconos al pie de la ventana de visualización. En la esquina inferior izquierda se podrá ver en todo momento un dibujo que recuerda a una casa, mientras que en el lado opuesto, en la esquina inferior derecha, encontraremos el dibujo de una flecha. Si se sitúa el cursor sobre alguno de estos dos iconos el grosor de las líneas del dibujo aumenta, indicando que si se hace clic en ese momento con el botón izquierdo del ratón estaremos seleccionando alguna acción concreta. En el caso de seleccionar el dibujo de la casa estaremos diciéndole a la aplicación que nos devuelva al menú principal, mientras que si se selecciona el

dibujo de la flecha lo que entenderá el programa es que solamente queremos retroceder una pantalla.



Fig. 27 Botón para volver al menú principal, a la izquierda, y botón para retroceder una pantalla, a la derecha

Es preciso destacar que en todos los apartados de la aplicación se supone que el material empleado es acero. Esto nos llevará a que el programa ofrezca la posibilidad de analizar los perfiles más habituales para este material.

4.2.1.1. Análisis elástico

En caso de seleccionar la opción de análisis elástico en el menú principal la aplicación nos lleva a una nueva pantalla donde se debe tomar una decisión en relación al tipo de elemento que se quiere analizar. Teniendo presente que los resultados que se mostrarán en la ventana siempre van a ser en régimen elástico, se puede optar por estudiar un modelo de una viga o de un pórtico. De igual forma que en la pantalla inicial, clicando sobre la estructura deseada el programa pasará a una nueva pantalla. Sea cual sea la decisión tomada, en la nueva ventana aparecerán distintos apartados que permiten introducir todas las variables necesarias.

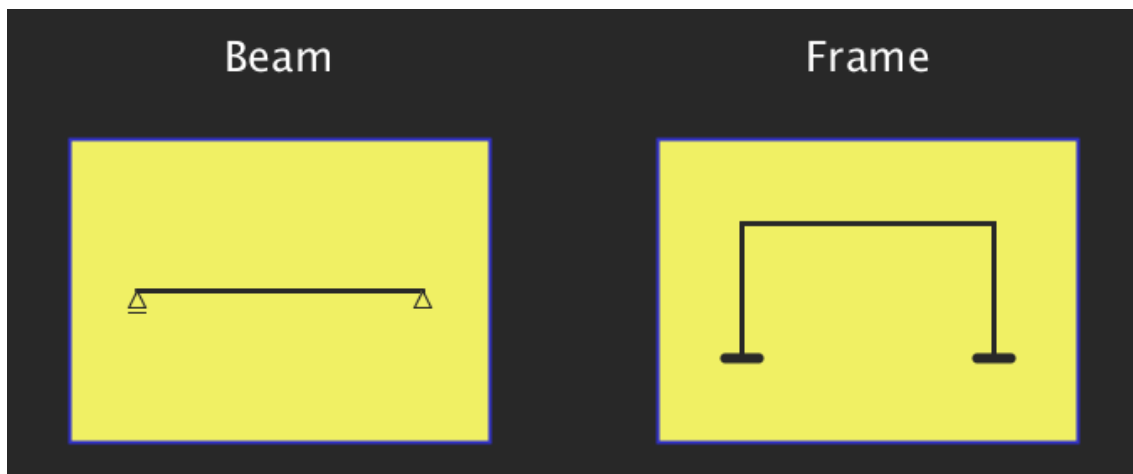


Fig. 28 Botones para seleccionar el tipo de estructura a analizar, viga a la izquierda y pórtico a la derecha

- Viga

Si se ha escogido la alternativa de viga se deberán introducir cuatro variables. La primera de ellas hace referencia al tipo de sección transversal y se puede definir mediante un

menú que muestra tres posibilidades: una sección rectangular maciza, un perfil IPE o un perfil rectangular hueco. La segunda variable a definir es la altura de esta sección transversal, una dimensión que se fija de forma visual determinando la longitud de una barra azul que aparece en la pantalla. Moviendo el cursor sobre la barra de este apartado es posible cambiar la altura de la viga que se quiere estudiar. Por simplicidad, y por practicismo, las alturas a escoger para cualquier tipo de perfil responden a las alturas típicas de un perfil IPE, entre 80 mm y 600 mm.

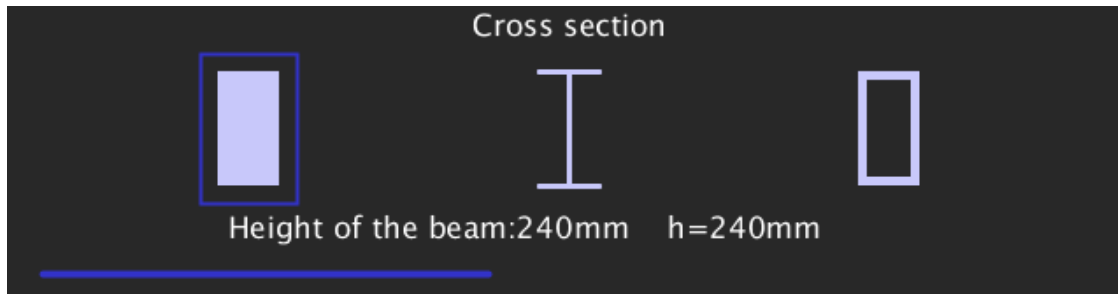


Fig. 29 Menú para definir el tipo de sección transversal, en la parte superior y con la sección maciza seleccionada, y barra para definir la dimensión del perfil, en la parte inferior

Con estas dos primeras variables la aplicación define el resto de la geometría del perfil, siguiendo en cada caso unos criterios concretos. Para el perfil macizo, se ha decidido que el programa defina un ancho de sección igual a la mitad de la altura e inmediatamente calcule, siguiendo la fórmula adecuada, el momento de inercia. En el caso de la sección IPE, gracias a un catálogo de perfiles, el código elaborado incluye la relación entre cada altura posible y el ancho del perfil, de las alas y del alma, así como el momento de inercia apropiado, de forma que una vez se define la altura también quedan definidas automáticamente todas estas variables. En cuanto a la sección hueca, el ancho también se define como un medio de la altura y el grosor de las paredes como una quincuagésima parte de la altura, siguiendo un criterio arbitrario en ambas dimensiones. De todas formas, para evitar espesores muy finos se establece un grosor mínimo de 3 mm. Con la altura, el ancho y el grosor de las paredes el código incluye una fórmula que calcula directamente el momento de inercia para este perfil.

Así pues, las dos primeras variables que hay que ingresar en esta pantalla permiten definir por completo la sección de la viga, pero aún es necesario decirle al programa cuál será la longitud de dicha viga y bajo qué condiciones trabajará. La longitud se puede establecer mediante una barra azul similar a la que se usa a la hora de determinar la altura de la viga, aunque en este caso es posible seleccionar un valor entre 1 y 10, pudiendo escoger unidades enteras. Cabe destacar que aunque en el modelo la luz de la viga sea del orden de centímetros, para poder representar casos más reales se ha decidido que la longitud sea del orden de metros.

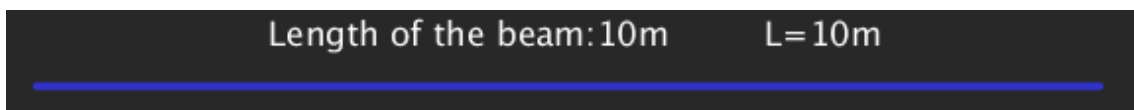


Fig. 30 Barra para definir la longitud, en la imagen con la máxima posible

Por último, antes de pasar a la siguiente pantalla, un menú ofrece 6 tipos distintos de vigas:

- 4 vigas de un solo vano:
 - Ménsula
 - Viga simple biapoyada
 - Viga apoyada en un extremo y empotrada en el otro
 - Viga biempotrada
- 2 vigas continuas de 2 vanos con mismas longitudes
 - Viga con tres apoyos simples
 - Viga empotrada en los extremos con un apoyo simple en el centro

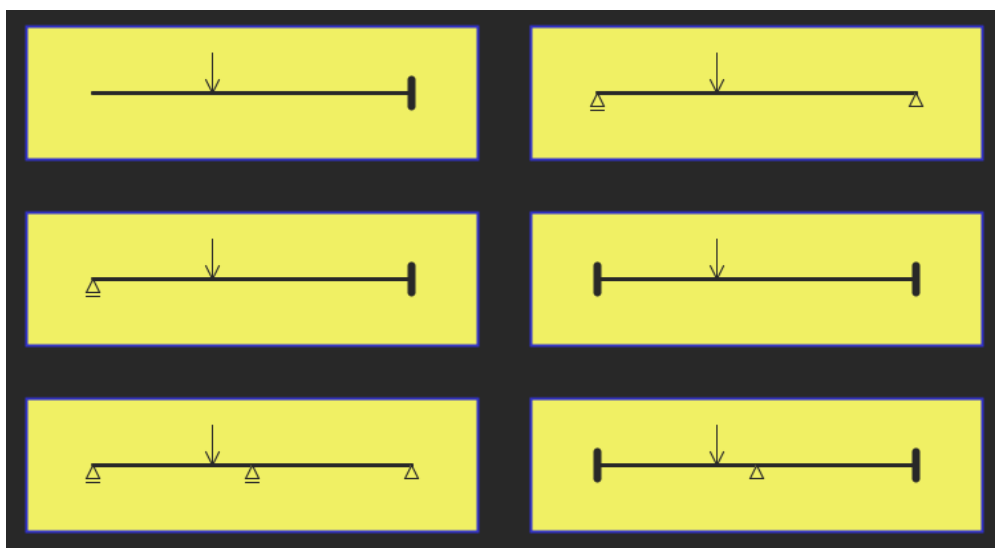


Fig. 31 Menú que muestra las 6 alternativas de viga

El hecho de ofrecer estas 6 alternativas y no otras se debe, principalmente, a que lo que se busca es representar casos típicos y generales empleados en la docencia de análisis de estructuras. Otras opciones podrían haber sido también contempladas, de la misma forma que se podría prescindir de alguna de las ya incluidas.

Tras clicar sobre el recuadro de la viga deseada, la aplicación pasa a una nueva y última ventana en la que muestra varios resultados. Esta ventana está encabezada por un recuadro de color distinto al resto de la pantalla, mostrando un esquema de la viga seleccionada e incluyendo tres parámetros: la longitud de la viga, la distancia a la que se aplica una fuerza y la magnitud de esta fuerza. El primer parámetro se ha definido previamente, así como la sección transversal aunque aquí no se muestre, y no cambiará durante el experimento. En cambio, tanto la fuerza como la distancia a la que esta se aplica pueden variar en función de la información que llegue desde el microcontrolador Arduino, es decir, la pantalla mostrará una respuesta casi instantánea a lo que suceda en el modelo en cada momento. De la misma forma que la luz de la viga se ha magnificado para dar realismo al problema, la distancia a la que actúa la carga se escala en relación a la longitud definida y a las dimensiones del modelo. Por

su parte, la fuerza puntual aplicada se incluirá asimilando que los datos recibidos son en kilonewtons, un orden de magnitud adecuado para las dimensiones de la estructura. De nuevo, se sigue un criterio arbitrario, pero los casos que esta modificación permite analizar son más plausibles en la realidad.

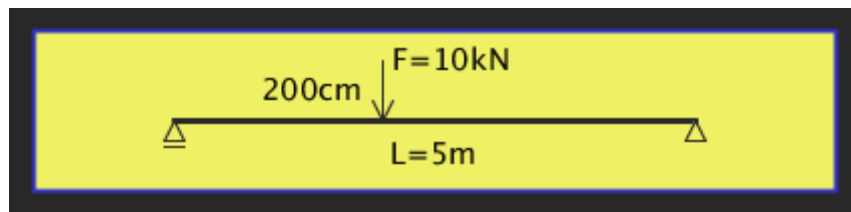


Fig. 32 Resumen de la viga seleccionada

El recuadro que encabeza la página sirve como resumen del caso concreto que se está analizando, pero debajo de él aparecen algunos resultados derivados del análisis estructural, resultados interesantes a la hora de saber qué ocurre en la viga. Antes de nada, hay que aclarar que los resultados que se muestran dependen de todas las variables anteriormente introducidas, de forma que si alguna de estas variables varía a tiempo real según lo que suceda en el modelo, que es precisamente el caso de la fuerza y la distancia, los resultados serán también una respuesta a tiempo real.

Inmediatamente debajo del recuadro principal se muestran dos líneas, ambas representando la viga. La primera de ellas se complementa con un esquema de la ley de cortantes que sufre la estructura, mientras que la segunda muestra la ley de momentos flectores. Las dos leyes son calculadas gracias a las fórmulas en régimen elástico particulares para cada caso, incluidas en el código y en función de los inputs ya explicados. El momento flector, cuya ley no tiene tramos uniformes como en el caso del cortante, se acompaña únicamente de los valores extremos. Además, en los dos dibujos se respeta siempre la proporcionalidad entre la longitud de la viga y la posición en la que se aplica la fuerza.

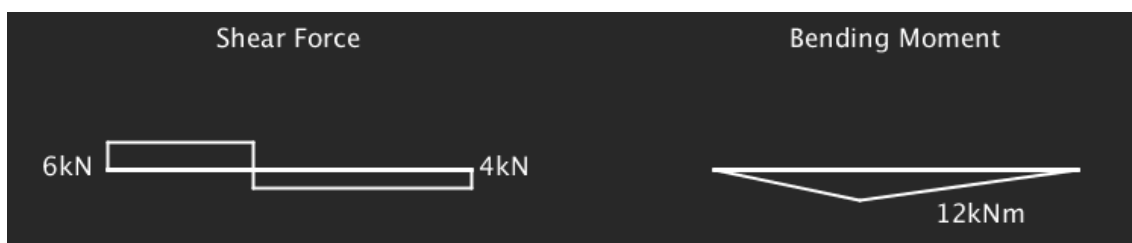


Fig. 33 Ley de cortantes de la viga, a la izquierda, y ley de momentos, a la derecha

Lo siguiente que muestra la ventana son resultados relacionados con la sección de la estructura, con lo que también dependerán del perfil escogido. En la parte izquierda aparece la tensión normal en la sección con máximo momento, es decir, la máxima tensión normal. En la parte derecha se muestra la tensión tangencial máxima calculada con el mayor cortante. Esta

última tensión tiene una distribución cuya forma varía según el perfil que se quiera estudiar. Sabiendo esto, tanto el perfil macizo como el IPE se representan tal y como deben ser, siguiendo las restricciones de sus geometrías, pero el caso del perfil hueco se ha simplificado en una distribución uniforme debido a la delgadez de sus paredes.



Fig. 34 Tensión normal máxima, a la izquierda, y tensión tangencial máxima para un perfil IPE, a la derecha

Por último, la aplicación muestra la deformada de la viga, resultante de la fuerza ejercida y de las condiciones de contorno. El código del programa incluye las fórmulas necesarias para calcular el movimiento vertical de cada punto de la viga, todo en función de la geometría y de la fuerza actuante, pero para hacer la visualización más atractiva se ha distorsionado la escala vertical. El valor que se muestra es la flecha máxima que se alcanza en la estructura.



Fig. 35 Deformada de la viga, el valor mostrado indica la flecha máxima en centímetros

- Pórtico

Para la opción de estudiar el comportamiento de un pórtico el funcionamiento de esta herramienta difiere en varios aspectos del caso de la viga. Para empezar, se ha definido que el programa presuponga los perfiles de las columnas y de las vigas. Las secciones escogidas responden a algunas de las más típicas para cada elemento, en concreto: perfiles IPE en el caso del dintel y perfiles HEA para las columnas. Los parámetros que quedan libres y que deben ser fijados por el usuario son las longitudes de los elementos y el tamaño de la sección. Siguiendo el criterio de representar casos semejantes a estructuras reales, tanto la altura de las columnas como la longitud de la viga son del orden de metros. La aplicación permite escoger alturas de las columnas de metro en metro y hasta 10 m, considerando siempre que ambas columnas son iguales, mientras la viga puede llegar hasta los 20 m. Los dos casos se deben definir con el uso

del cursor y ajustando la longitud de una barra hasta el valor deseado. Por otra parte, las dimensiones de las secciones también se definen usando el mismo recurso y, de la misma forma que ocurre en la opción de estudiar una viga, se ofrecen los perfiles comerciales más comunes: las columnas van desde una sección HE 100 A hasta una HE 1000 A y las vigas desde una IPE 80 hasta una IPE 600. Sólo con esta información el programa asocia directamente al problema el resto de dimensiones del perfil, así como el momento de inercia ya calculado.

Fig. 36 Barras que permiten definir las dimensiones de las columnas, parte superior, y de la viga, parte inferior

El paso restante, antes de avanzar a la última pantalla de resultados, es definir en qué parte del pórtico se va a aplicar la fuerza. Hay que destacar primero que en todo caso la estructura se considerará rígida, sin ningún tipo de rótula y doblemente empotrada en las bases de sus columnas. Sabiendo esto, la herramienta permite aplicar una fuerza puntual de tres formas distintas, como muestra la figura 37: una fuerza vertical sobre la viga, una fuerza horizontal actuando sobre una columna y desde el exterior o una fuerza vertical sobre un voladizo interno unido a una de las columnas. Al clicar sobre alguno de los recuadros que muestran el esquema de estos tres casos el programa pasará a la siguiente y última pantalla, la que muestra resultados tras procesar los inputs recibidos.

A más a más de los parámetros que se han definido en la pantalla anterior, para mostrar resultados la ventana final necesita la magnitud de la fuerza y la distancia a la que se aplica en cada caso. Estas variables se reciben continuamente desde la placa, como en el caso de la viga, pero en la modalidad de estudio de un pórtico es preciso aclarar la posición de la carga. Cuando la fuerza actúa sobre el dintel la distancia se mide desde la unión viga-columna izquierda, mientras que si la fuerza se ejerce sobre la columna la distancia es medida desde la base de la estructura. Por último, en el caso de aplicar la fuerza sobre un voladizo, la distancia que requiere el programa es la que separa la base del pórtico y el mismo voladizo, pero también es necesario saber el brazo de palanca entre la carga y la columna. Para esta

aplicación se ha decidido fijar 1 m como brazo de palanca con el fin de simplificar la herramienta. Como las longitudes de los elementos se han definido en metros, las distancias medidas, que serán del orden de centímetros, se tienen que escalar respetando las proporciones del modelo. De la misma forma, la fuerza real medida en el modelo será muy pequeña para una estructura con magnitudes del orden de metros, con lo que se supondrá que corresponden también a kilonewtons.

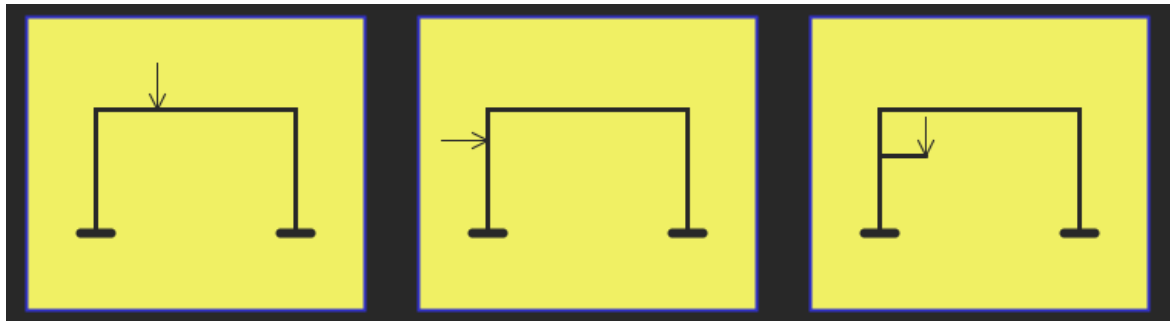


Fig. 37 Botones para seleccionar en qué punto se aplica la fuerza

Con todas las variables conocidas el programa procesa los datos y muestra tres dibujos. El primer esquema que aparece en la ventana, a parte de un recuadro con la fuerza que se ejerce en cada instante, es un dibujo de las leyes de momentos flectores. El programa muestra los valores en aquellos puntos del pórtico más representativos y que permiten definir completamente la ley. Añadido a los momentos, este primer dibujo también muestra las reacciones que aparecen en los pies de las columnas a causa de la fuerza, en otro color para facilitar la distinción con la ley de momentos.

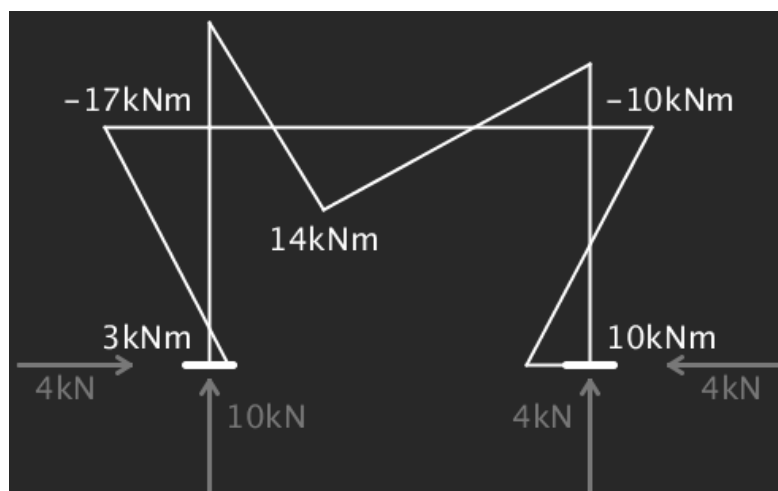


Fig. 38 Ley de momentos del pórtico, en blanco, y reacciones, en gris

Para acabar, la parte inferior de la ventana de resultados muestra dos esquemas referentes a la tensión normal que sufre la sección de la estructura. En concreto, se puede ver

la tensión normal máxima sufrida por las columnas y la sufrida por la viga, en dos distribuciones separadas.

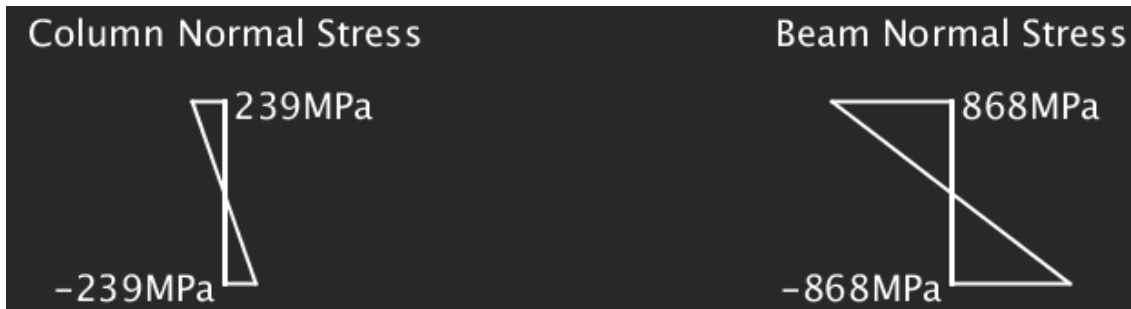


Fig. 39 Tensión normal máxima en las columnas, a la izquierda, y en la viga, a la derecha

4.2.1.2. Análisis plástico

Si la opción por la que se decanta el usuario al iniciar la aplicación es el análisis plástico, el experimento que se llevará a cabo ya no consistirá en aplicar una fuerza sobre el modelo a escala, como ocurría en el caso de régimen elástico. Los conceptos y procedimientos en esta parte son un tanto más teóricos y, además, la interacción física en este caso no es tan directa. Sea como sea, lo que se pretende en este apartado es mostrar la transición entre el régimen elástico y el plástico mediante un caso simple y fácilmente comprensible.

Lo primero que se muestra tras clicar en la opción de análisis plástico es un recuadro con la estructura que se utilizará en todo momento en este apartado. Como ya se ha dicho, se busca la simpleza, de forma que se ha optado por una viga simple biapoyada bajo la acción de una fuerza puntual aplicada en el centro de la luz. Esto permite estudiar justamente el punto donde se encuentra la carga, ya que se conoce que es en él donde ocurrirán las mayores tensiones y deformaciones.

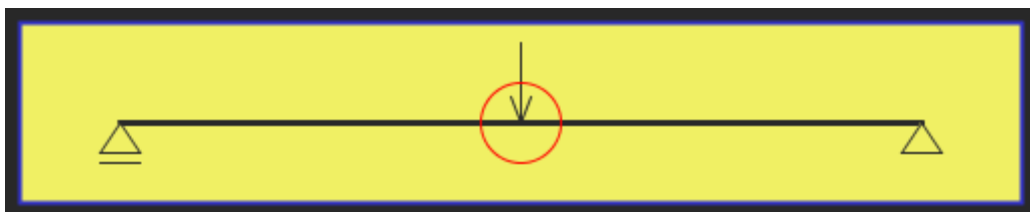


Fig. 40 Estructura utilizada en el análisis plástico, con el punto a estudiar marcado

La primera pantalla de éste apartado también sirve para introducir las variables necesarias para el problema, con lo que el programa ofrece una serie de menús que se pueden ir seleccionando con el uso del cursor del ordenador. A diferencia de las anteriores secciones de la aplicación, que pretenden representar casos más reales, en el presente apartado se da la posibilidad de escoger magnitudes más reducidas con el fin de analizar estructuras que sean posibles de ensayar en laboratorio y relacionar los resultados obtenidos. Lo primero que se

pide es la longitud de la viga, que como ocurre en los otros casos, debe ser definida por medio de la longitud de una barra que aparece en la pantalla. Seguidamente aparece otro menú con cuatro aceros de distinta calidad, los más comunes y sencillos: S235, S275, S355 y S450. Situando el cursor sobre cada uno se puede apreciar que las letras cambian de color, si se clic en ese momento se puede seleccionar el grado deseado del material. Lo último que queda por definir en esta pantalla son las dimensiones de la sección transversal. Esta sección viene definida como una sección rectangular maciza, hecho que simplifica el problema, pero el usuario debe fijar tanto el ancho como la altura del perfil, utilizando el mismo sistema de la longitud de una barra. El código incluye los límites elásticos de cada grado de acero en función del grosor nominal de la sección, de modo que el programa añade directamente este parámetro al problema. Con todas estas variables definidas, si se hace clic sobre el botón 'Continue' el programa pasará a la pantalla de resultados.

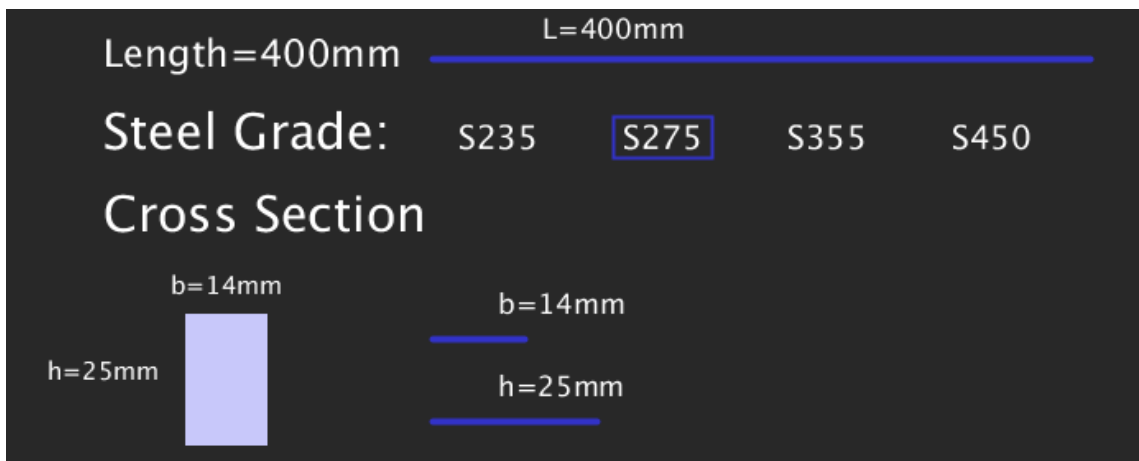


Fig. 41 Barra para seleccionar la longitud de la viga, arriba del todo, menú para seleccionar la calidad del acero y barras para definir el ancho y alto de la sección transversal, en la parte inferior

Hasta ahora se conoce la geometría, el material y las condiciones de contorno del problema, pero aún queda un dato por introducir. El último input necesario en este caso es el ángulo de giro en el centro de la viga, un dato que proviene del microcontrolador, que a su vez lo recibe del potenciómetro. Este ángulo definirá todos los resultados, que irán variando en función de él, y para que estos tengan coherencia se estudiará lo que ocurre hasta unos ángulos máximos del orden de 10^{-4} rad. El ángulo que define el problema en cada momento encabeza la ventana de resultados, y a continuación se muestran varios diagramas.

El primer diagrama de la pantalla final representa la deformación de la sección central de la estructura. Esta gráfica depende directamente del ángulo, a parte de la geometría. A la misma altura que el diagrama de la deformación se muestra otro correspondiente a la tensión. El valor de la tensión es calculado por el programa a partir de la deformación y del módulo de elasticidad del acero, un parámetro incluido en el código. Hay que destacar que la aplicación comprueba continuamente si se excede el límite elástico, de forma que cuando una fibra plastifica se refleja en el dibujo haciendo que la tensión deje de aumentar y sea igual al límite, empezando lógicamente por las fibras exteriores.

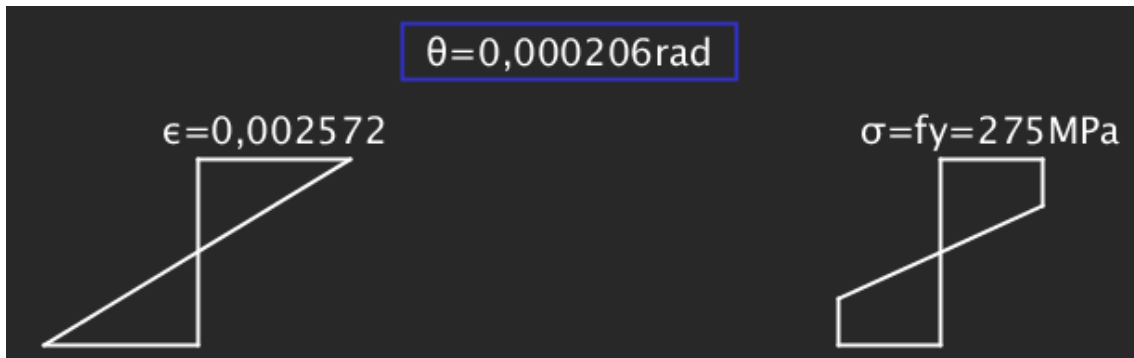


Fig. 42 Ángulo introducido por el usuario, arriba, deformación del punto medio, a la izquierda, y tensión del mismo punto con algunas fibras ya plastificadas, a la derecha (se muestra el valor máximo)

La ventana de resultados muestra otro diagrama que representa la viga y su deformada, como en la figura 43. A partir de la distribución de tensiones, el programa es capaz de calcular el momento flector que sufre el centro de la viga correspondiente a cada giro, y añadiendo la longitud de la viga y las condiciones en los apoyos se puede calcular la magnitud de la fuerza que, actuando puntualmente en el centro de la estructura, generaría la situación actual. Además, como se conoce el límite elástico, el programa también calcula la fuerza necesaria para alcanzar este máximo. Este último cálculo permite dibujar la deformada de la estructura de forma progresiva pero hasta llegar a la fuerza límite, de modo que una vez se alcance esta la flecha en cada punto no cambiará más. Para mostrar el paso de régimen elástico a plástico se ha decidido dibujar la deformada en color verde para el primero, y en color rojo, a modo de aviso, para el segundo. Para mostrar que el proceso continúa aunque la deformada no varíe más, se ha prescrito que una vez que la viga empieza a plastificar la aplicación advierta de la creación de una rótula plástica en el centro de esta. Por último, la rótula también indica que sufre cambios mediante la intensificación de su color, que pasa de blanco a tonos más intensos de rojo, a medida que el ángulo sigue aumentando.

Para acabar con los resultados del análisis plástico, en el pie de la ventana aparece un gráfico doble, el mismo que en la figura 44. El eje de las abscisas es común y representa la deformación en la sección central. Este eje tiene como punto de interés la deformación en el límite elástico, y se muestra con su valor correspondiente. En el margen izquierdo de la pantalla aparece un eje de ordenadas que hace referencia a la tensión normal. Siguiendo lo previamente expuesto, la curva de este gráfico crece de forma lineal hasta alcanzar la tensión máxima, cuya abscisa es la deformación en el límite elástico, y a partir de este punto es constante en todo momento. Por otro lado, en el lado derecho de la pantalla se muestra otro eje de ordenadas referente al momento flector del centro de la viga. A diferencia de la curva anterior, la que genera el momento no para de crecer, pero lo hace de forma más paulatina al sobrepasar el límite elástico. Tanto la tensión en el límite elástico como el momento en ese mismo instante se muestran en sus respectivos ejes. Finalmente, de la misma forma que en el dibujo de la deformada, las dos curvas de este gráfico cambian su color de verde a rojo en el momento en que la estructura empieza a plastificar.

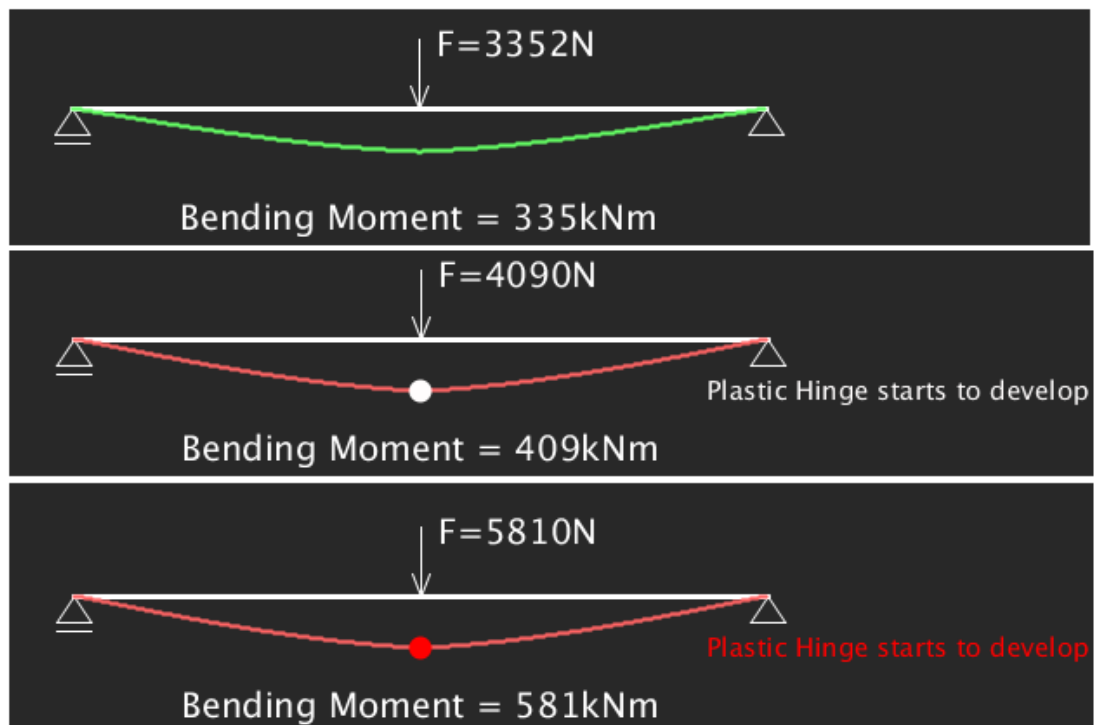


Fig. 43 Deformada de la viga en tres estados distintos:
 1) Con todos los puntos en régimen elástico
 2) El punto medio empieza a plastifica (aparece rótula y aviso)
 3) Desarrollo de la rótula y cambio de color a rojo

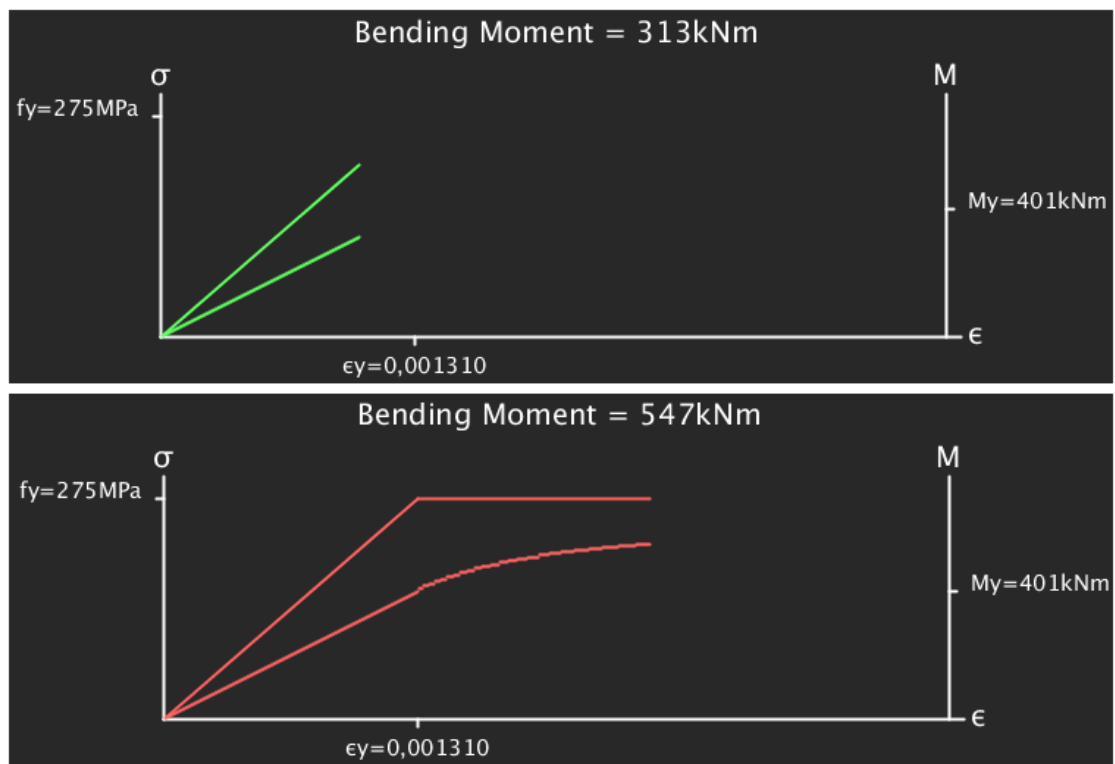


Fig. 44 Gráficos que muestran la tensión, curva superior, y el momento, curva inferior, en función de la deformación. Arriba antes de plastificar y abajo ya sobrepasado el límite elástico

4.2.2. Código del programa en Processing

El código desarrollado que permite visualizar la aplicación consta de más de 3000 líneas de instrucciones, las cuales pueden servir desde para leer datos que llegan de la placa *Arduino* hasta para dibujar una simple línea en la pantalla del ordenador. La gran extensión de texto que conforma el código no permite explicarlo paso a paso, entrando en pequeños detalles, pero sí es posible mostrar superficialmente su estructura.

La primera parte de la que consta el código es la declaración de todas las variables que se utilizan posteriormente a lo largo de todo el programa, incluyendo aquellas que se reciben gracias a los sensores. Además, en esta parte principal es preciso llamar a una librería de *Processing* que nos permita comunicarnos con aparatos externos a través de un puerto serie, así como crear un objeto que sea de la clase serial, el cual posibilitará abrir el puerto serie más adelante y que en este ejemplo es llamado *myPort*.

```
import processing.serial.*;
Serial myPort;

float F=0;
float pot=0;
float X_1=0;
float X_2=0;
float X_3=0;

int struct=0;
int type=0;
int type2=0;
```

Fragmento del inicio del código: llamada a la librería serial, definición de un objeto de clase serial, declaración de variables que se recibirán de Arduino y ejemplo de declaración de otras variables

De igual forma que en el programa de *Arduino*, los códigos de *Processing* constan también de dos partes importantes en su estructura. La primera de ellas sólo se ejecuta una vez al empezar todo el proceso y sirve para configurar el entorno. En este lenguaje, dicha parte se conoce con el nombre de *setup()*, y en el presente programa incluye dos instrucciones: abrir el puerto al que está conectada la placa, utilizando la misma velocidad a la que esta envía los datos (9600 bits por segundo), y crear una pantalla donde se visualizará la aplicación y que tiene unas dimensiones de 800 píxeles de ancho por 700 de alto.

```
void setup() {
    myPort = new Serial (this, Serial.list()[0], 9600);
    println(Serial.list());
    size(800, 700);
}
```

Función *setup()*: apertura del puerto a la misma velocidad que envía Arduino, impresión por pantalla del número del puerto (para su localización) y creación de la pantalla de visualización

La segunda parte importante de la estructura es la función *draw()*, una función que es llamada automáticamente después del *setup()* y que ejecutará cíclicamente todas la líneas que

estén contenidas en ella, salvo orden explícita de no hacerlo. Por lo tanto, se puede considerar que esta sección es el cuerpo principal de todo el programa, la que contiene los aspectos más relevantes.

Lo primero que encontramos en esta función es el tratamiento de los datos captados en el modelo físico, ya que al ser magnitudes que irán variando según las acciones del usuario es preciso que su lectura se vaya actualizando constantemente. Como se ha visto en el apartado de medición de magnitudes, *Arduino* envía una cadena de caracteres de la siguiente forma: “*F,posición,X_1,X_2,X_3,*”. Esta información llega al ordenador como una serie de cadenas similares a la expuesta pero sin ningún tipo de separación, con lo que lo primero que hay que hacer es separarlas de forma adecuada. Para ello se ha incluido un punto al final de cada envío de información y lo que se le ha introducido al programa es que lea las cadenas de caracteres hasta este punto, además de asignarle la clase *String* (secuencia de caracteres) y un nombre. Con la información de cada paquete de datos ya localizada ahora falta distinguir a que variable pertenece cada valor para poder tratarlas por separado. En este caso se ha utilizado una coma como separador de cada variable, y lo que hace el programa es crear un vector de valores a partir de la *String*, cuyos elementos serán los caracteres situados entre las comas de cada cadena. Lo último que queda por hacer es asignar a las variables adecuadas el valor correspondiente, conociendo el orden con el que se han enviado los datos desde la placa.

```
void draw() {  
  String inString = myPort.readStringUntil('.');  
  if (inString !=null){  
    float[] valores = float(split(inString, ","));  
    F=valores[1];  
    pot=valores[2];  
    X_1=valores[3];  
    X_2=valores[4];  
    X_3=valores[5];  
  }
```

Primera líneas de la función draw(): creación de la String que contiene los datos de cada envío, separación de las variables en una matriz y asignación de cada elemento de la matriz a la variable correspondiente.

Las líneas de código incluidas en la función *draw()* que siguen a las ya presentadas son una serie de instrucciones para crear los menús seleccionables, los esquemas, los botones, los resultados y toda la información adicional que se muestran en la aplicación y que se han expuesto en la descripción de la herramienta. El código está basado en la creación de geometrías (puntos, líneas, rectángulos, circunferencias, etc,) que modifican su color y su grosor o que aparecen y desaparecen, siempre en función de acciones realizadas con el cursor por el usuario y de los inputs físicos del modelo, con el fin de generar un entorno de visualización atractivo e intuitivo. Al ir avanzando por cada pantalla el programa se va alimentando de inputs que definirán geometrías posteriores, permitiendo así mostrar una pantalla de resultados a modo de respuesta.

```
  if ((mouseX > 100) && (mouseX < 700) && (mouseY > 300) &&  
      (mouseY < 400)) {  
    fill(200,200,100);
```

```

        if (mouseButton== LEFT){ analisis=1;}
    } else {
        fill(240,240,100);}

```

Ejemplo de interacción requerida por el programa: se define un espacio de la pantalla sobre el cual se sitúa el cursor cambia su aspecto, indicando así que se trata de un botón, y si se clicca sobre él se altera una variable.

Como ya se ha dicho, el programa avanza conforme se va clicando con el ratón sobre determinados menús y botones. Para poder trabajar de esta manera, es preciso introducir instrucciones que hagan referencia a la situación del cursor, por ejemplo para determinar si este está situado sobre un botón, y que registren si el ratón es presionado o no. De esta forma se puede alterar el estado de unas variables utilizadas como indicadores que derivarán el programa hacia un camino o hacia otro, como si se tratara de un diagrama lógico semejante al de la figura 45.

Por último hay que destacar que las geometrías que aparecen en las páginas de resultados, así como los cálculos intermedios y los valores finales que aparecen en algunos casos, están basadas en una serie de ecuaciones procedentes del análisis de estructuras. Dichas ecuaciones están incluidas en el código, de forma que este es capaz de introducir en ellas las variables adecuadas en cada momento, procesar toda la información y ofrecer un valor resultado, el cual se mostrará por pantalla o se utilizará para dimensionar la geometría final. Ni las ecuaciones empleadas ni los pasos intermedios se muestran en ningún momento, ya que se pretende ofrecer información ya procesada y con sentido ingenieril. De todas maneras, todas las fórmulas empleadas se pueden ver en el anejo que se incluye al final de este trabajo.

```

//CORTANTES
stroke(255);
strokeWeight(3);
line(80,210,320,210);
strokeWeight(2);
a=X;
b=L-X;
u=X*240/L;
V=F;
line(80+u,210,80+u,210+2*V);
line(80+u,210+2*V,320,210+2*V);
line(320,210+2*V,320,210);
fill(255);
textSize(17);
textAlign(LEFT);
text(round(F)+"kN",325,210+F);
textAlign(CENTER);
text("Shear Force",200,150);
text("Normal Stress",200,300);

text("Bending Moment",600,150);
text("Shear Stress",600,300);
text("Displacement",400,525);
//MOMENTOS
stroke(255);
strokeWeight(3);
line(480,230,720,230);
strokeWeight(2);

M=F*b; //kNm
Mmax=b*20;
line(480+u,230,720,230-
M*(80/Mmax));
line(720,230-
M*(80/Mmax),720,230);
textAlign(LEFT);
text(round(M)+"kNm",725,240-
M*(80/Mmax));

```

Ejemplo de uso de las magnitudes físicas de posición X y de fuerza F: se definen nuevas variables en función de ellas y de otros datos introducidos con el cursor, en este caso la longitud de la viga. A partir de ellas se puede calcular el cortante y el momento flector y dimensionar los esquemas que los representan.

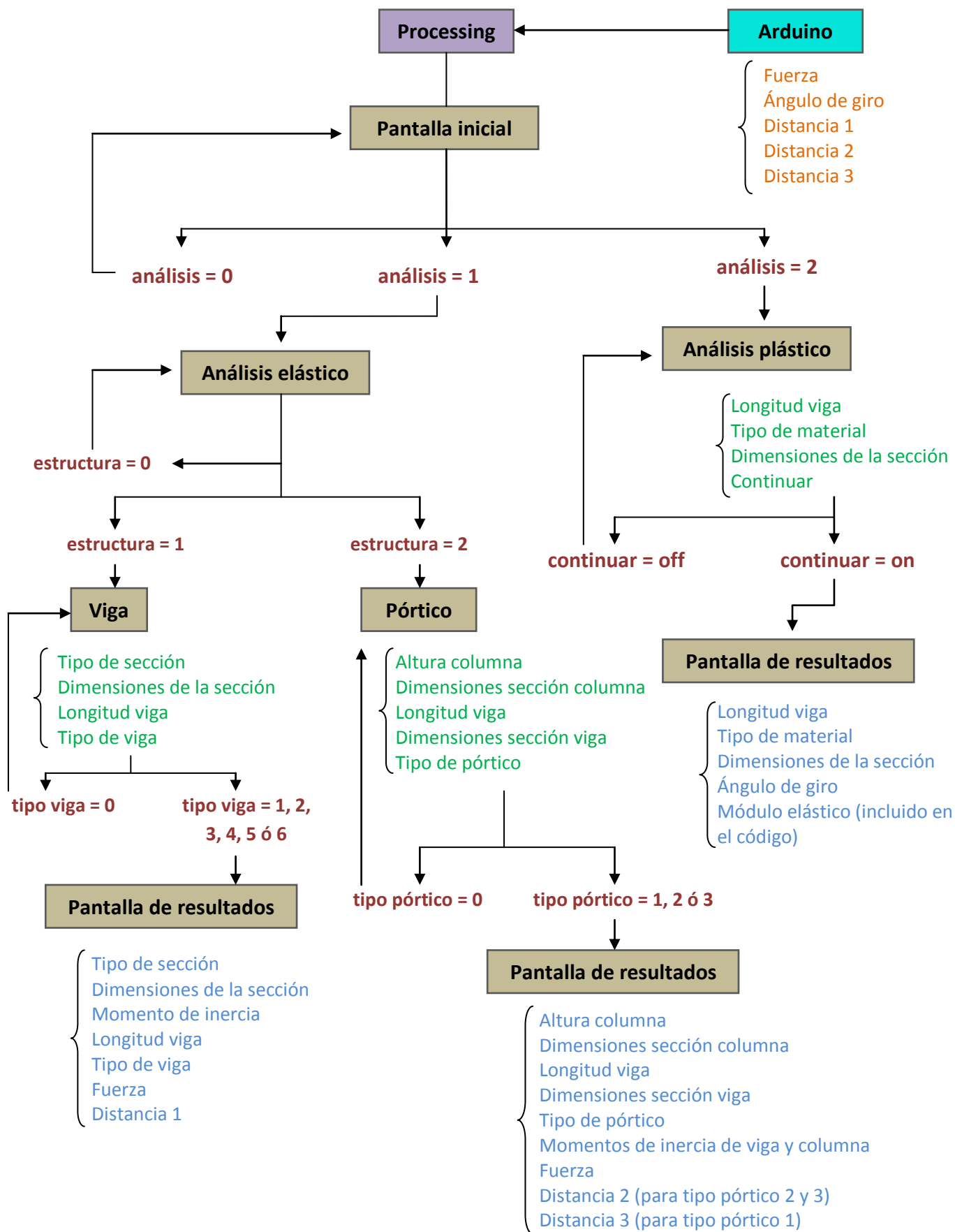


Fig. 45 Esquema lógico del programa: variables que proporciona Arduino (naranja), las distintas pantallas del programa (recuadros grises), variables que marcan el camino a seguir (granate), inputs introducidos en cada pantalla (verde) y variables usadas en pantallas finales para mostrar resultados (azul)

A modo de resumen, la información captada por los sensores es tratada en dos códigos separados. Las magnitudes físicas son recogidas como información analógica desde los dispositivos de captación y llegan hasta el dispositivo de adquisición Arduino. Es en la misma placa Arduino donde dicha información se convierte en digital, dándole sentido a los impulsos eléctricos procedentes de los sensores, y donde se consiguen las variables de interés, todo gracias a las instrucciones ingresadas previamente en el dispositivo. Además, en este paso intermedio se crea un paquete de información como vehículo para transmitir los datos, gracias al cual es posible entender más tarde qué valores corresponden a cada variable y es posible también distinguir la información que se va actualizando constantemente. Por último, esos paquetes de información llegan al ordenador o central de procesamiento, y a partir de ellos se deben recuperar las variables requeridas representativas del mundo real. Esto ocurre gracias al segundo código, esta vez ejecutado en el programa Processing. Una vez se han separado y se conocen bien las variables, el este segundo código se encarga de ingresarlas en las fórmulas adecuadas, complementándolas en todo momento con el resto de información procedente de la interfaz gráfica de usuario. Precisamente, es la interfaz gráfica la que funciona como medio para exponer los resultados finales, los cuales gracias a este proceso, representado en la figura 46, son actualizados en tiempo real.

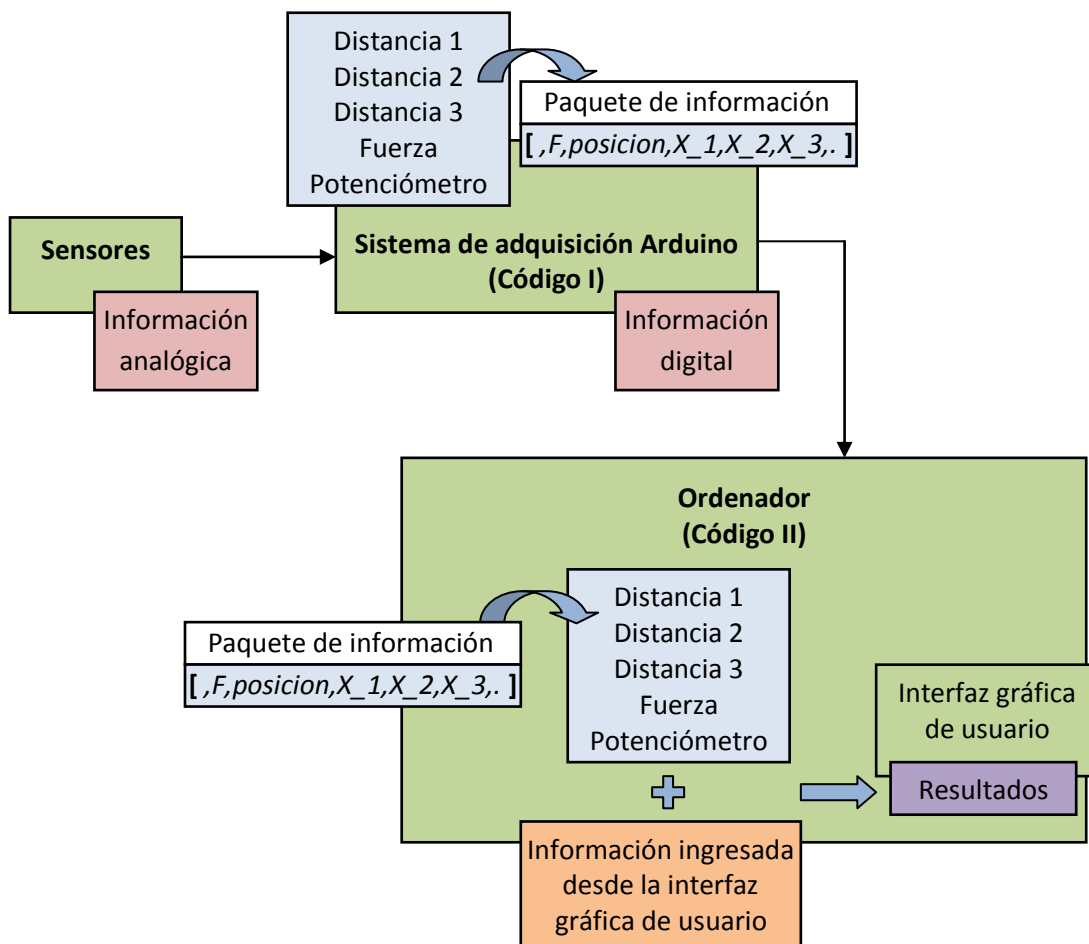


Fig. 46 Gráfica que representa el tratamiento de los datos desde que estos son captados por los sensores hasta que se muestra un resultado por pantalla, tras pasar por dos códigos

5. Futuras mejoras

El proyecto desarrollado cumple con los objetivos de monitorizar una estructura, en este caso un modelo a escala, haciendo uso de unos dispositivos cuya fabricación no ha sido concebida especialmente para este fin. No obstante, estos objetivos pueden ampliarse con vistas a futuras implementaciones en casos reales, o simplemente pensando en adentrarse en otros campos cuya aportación pueda mejorar las prestaciones del trabajo.

Uno de los nuevos objetivos que se puede perseguir es el de aumentar la precisión de los sensores. Si bien es cierto que en el caso que nos ocupa no se busca una fiabilidad extrema, sino que interesa estudiar los distintos aspectos de un sistema de SHM, es interesante prestarle atención a la exactitud con la que trabajan los dispositivos encargados de obtener las magnitudes físicas. Los sensores de distancia aquí empleados no son capaces de distinguir situaciones en las que la posición varía menos de 5 cm, de forma que la estructura de nuestro modelo queda segmentada. De la misma forma, el sensor de presión empleado ni siquiera mide una magnitud real, sino que se ha definido su rango de trabajo siguiendo un criterio de proporcionalidad. Así pues, sustituyendo los sensores adecuados por unos más sofisticados, capaces de captar magnitudes con gran rigor, se conseguiría dotar al problema de más realismo y acercarlo a una posible implementación futura en una estructura real. No obstante, para decidir los nuevos sensores a emplear, hay que tener en cuenta que contra más precisión se quiera más grande será la inversión a realizar, con lo que se trata de valorar en qué punto se encuentra cada proyecto. Por ejemplo, unos sensores muy potentes empleados en la monitorización de una gran estructura seguramente no sean los más adecuados para un proyecto de las características de este, de la misma forma que los utilizados actualmente no servirían para monitorizar ningún caso real.

Por otra parte, la primera limitación que se encuentra al querer instalar el sistema de adquisición diseñado es el uso de cables. A priori, la comunicación entre los sensores y la placa Arduino no debería significar un problema, ya que la placa puede colocarse en la misma estructura y el cableado necesario es bastante simple. En cambio, la conexión entre la placa y el ordenador donde se procesarán en última instancia los datos adquiridos sí puede representar una restricción importante, puesto que dicho ordenador debe situarse cerca de la estructura. Teniendo esto en cuenta, una solución que parece factible es la utilización de dispositivos que, acoplados a la placa receptora de información, permitan una comunicación sin cables que haga llegar los datos adquiridos hasta el despacho o laboratorio desde donde analizar el estado actual y sacar conclusiones. La misma empresa Arduino ofrece módulos acoplables a las placas, o incluso placas que ya incluyen dichos módulos integrados, los cuales permiten trabajar sin cables por medio de una comunicación Wi-Fi y, muy importante, sin implicar grandes esfuerzos económicos. En un principio, la única diferencia que implica la adición de este elemento es la forma en que los datos se envían hasta el ordenador, con lo que redefiniendo los códigos de la aplicación desarrollada, ajustándolos al nuevo idioma de transmisión, este cambio se vería solventado. Para acabar con este tema hay que hacer referencia al hecho de que sin la conexión inalámbrica es posible controlar la estructura a tiempo real, pero solamente si nos encontramos con un modelo en el laboratorio o si nos

trasladamos al campo a pie de la estructura. Así pues, gracias al módulo Wi-Fi ahora es posible hablar de tiempo real, sea cual sea la situación de estudio, aportando el factor de inmediatez que en muchas ocasiones se requiere.

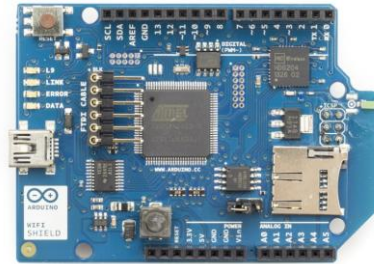


Fig. 47 Placa Arduino con Wi-Fi incluido

<https://www.arduino.cc> [18]



Fig. 48 Módulo Wi-Fi individual

<http://www.dx.com> [42]

En la misma línea de perseguir la inmediatez, en ocasiones es interesante contar con un sistema de alarma que avise a los responsables de las infraestructuras de alguna anomalía o, en casos extremos, que advierta a los usuarios de estas del peligro de usarlas en ese preciso momento. Con esta finalidad, hay que diferenciar dos fases a tener en cuenta: la detección de la situación anormal y el aviso. Para detectar que el elemento de estudio está sufriendo alguna imperfección, o que las solicitaciones son superiores a las previstas o a las permitidas, se deben incluir en el programa diseñado para la aplicación de visualización unos valores límite. Estos valores han de ser escogidos siguiendo la norma, como los estados límite de servicio o último, o a partir del mismo proyecto constructivo si se han realizado estudios más detallados de la estructura a monitorizar. Al final, lo que el ordenador hará es comparar los valores de las deformadas, los momentos y las tensiones con unos límites, y si estos son sobrepasados estará programado para avisar por pantalla y para realizar alguna acción adicional. Es aquí donde entraría el sistema de aviso, una vez que el programa ya ha detectado el problema, puede ser que informando por pantalla de dónde se ha detectado la anomalía y cuál es esta ya sea suficiente, pero es posible que interese que este aviso también llegue a los usuarios de la infraestructura. Para implementar un sistema de alarma hay que tener en cuenta que la placa empleada ofrece pines de salida, por los cuales se puede enviar una señal eléctrica concreta y a través de los que existe la posibilidad de conectar dispositivos electrónicos. Con todo esto, lo

que interesa es instalar dispositivos capaces de transmitir la sensación de peligro, tales como los LED, cuya función sería emitir luz para avisar, o los zumbadores, dispositivos empleados para emitir sonidos. Cabe diferenciar que el aviso en la misma estructura mediante estos elementos electrónicos sólo debería activarse en caso real de peligro, cuando existiesen indicios claros que obliguen a restringir el acceso, mientras que los avisos intermedios, cuando se superan ciertos valores de interés para los ingenieros, deberían realizarse siempre en la aplicación creada para la monitorización.



Fig. 49 Dispositivo LED de color variable, a la izquierda, y zumbador, a la derecha

<http://www.dx.com> [42]

Otro de los objetivos que podrían abordarse en un futuro está relacionado con la investigación e inclusión de nuevas tecnologías, más que con aplicaciones reales inminentes. Concretamente, se trata de introducir en el sistema de monitorización de la salud estructural un concepto de vanguardia conocido con el nombre de realidad aumentada. Antes de nada, siguiendo la definición que realiza la web digital de la empresa Innovae [43], “la realidad aumentada consiste en combinar el mundo real con el virtual mediante un proceso informático, enriqueciendo la experiencia visual y mejorando la calidad de comunicación”. Esta combinación se realiza mediante el uso de cámaras que captan imágenes del mundo real, sobre las que se superpone información en forma de números, letras, filtros de color u otras imágenes, consiguiendo así que la imagen original sea más completa en relación al ámbito de interés, pero dando la sensación de que los suplementos forman parte de la realidad. Este concepto entraría en las últimas fases del sistema de monitorización, una vez ya se ha procesado toda la información captada, ya que su finalidad consistiría en mostrar de forma más visual, dinámica y rápidamente comprensible los resultados obtenidos. Sin querer profundizar en los detalles más técnicos, a continuación se enumeran y resumen los pasos a seguir para incluir un apartado de realidad aumentada dentro del proyecto:

- Antes de nada hay que decidir cómo se mostraría la imagen procesada. A priori dos opciones parecen las más razonables: mediante la pantalla de un ordenador o empleando la pantalla de un *Smartphone* u otro dispositivo móvil que disponga de cámara. Queda claro que la opción del ordenador requeriría incluir un dispositivo de grabación que pueda comunicarse con la computadora, mientras que el dispositivo móvil requeriría siempre incluir sistemas de transmisión de datos inalámbricos y un software especialmente diseñado para él.
- El segundo paso consiste en decidir qué se desea mostrar con el objetivo de complementar la realidad. Existen infinidad de posibilidades, pero hay que

decantarse por aquellas más aclaradoras y representativas del estado de la estructura. Si imaginamos que tenemos la imagen real, y a tiempo real, de la viga o del pórtico de este trabajo, parece razonable que se indiquen los valores máximos de los cortantes, los momentos y las tensiones, añadiéndole a la imagen final únicamente los números pertinentes y una flecha que indique el punto exacto al que caracterizan, por ejemplo. Lo mismo podría hacerse con las reacciones en los apoyos, o con las flechas máximas. De esta forma, lo que se estaría haciendo sería trasladar los esquemas de la aplicación a la imagen real del modelo. En cambio, otra opción podría consistir en emplear un sistema de colores que muestre, sobre la estructura dada, alguna magnitud interesante. Aplicar este método para representar la deformada de toda la estructura sería una posibilidad atractiva, empleando colores fríos para los puntos con menos movimiento y colores cálidos para los que se han desplazado más. Lo mismo podría aplicarse para representar los esfuerzos internos, aunque para ello se requeriría una potencia computacional más elevada.

- El siguiente punto se basa en crear los elementos digitales, discutidos ya en el segundo paso, y añadirlos a lo que capta la cámara. Para esto será preciso escoger un *software* adecuado, o crear un programa propio, que se nutra de los datos procesados con anterioridad y que sea capaz de crear las formas requeridas en base a estos. Además, dicho programa debe ser capaz de situar los elementos pertenecientes al mundo virtual en el lugar correcto de la imagen, para lo que hay que pasar al punto final.
- El último paso está relacionado, precisamente, con la necesidad que tiene cualquier software que se emplee de reconocer y situar la estructura a estudio dentro de la imagen. Una vez bien localizada esta, el programa puede añadir el resto de la información visual, pero el proceso de comprensión es el punto clave. Una posible solución, sin descartar otras alternativas, es el empleo de marcas físicas en la misma estructura que sean fácilmente detectables, como por ejemplo formas geométricas sencillas en los extremos de esta, de forma que si estos se detectan se pueda estimar donde se encuentra el resto de la construcción. Finalmente, se lograría componer una imagen donde todos los elementos, reales y digitales, formaran un conjunto con sentido ingenieril.

Para acabar, y siguiendo con la realidad aumentada, hay que volver a destacar que su aportación a este proyecto sería más bien a modo de exploración de otros campos, ya que sus aplicaciones no están todavía muy claras dentro de la ingeniería civil. Sin embargo, es posible imaginar que en un futuro este concepto sea útil en algunos casos, como podría ser mostrando a los operarios y a los responsables de forma rápida y concisa el estado de una estructura durante un proceso constructivo concreto o, en las fases finales de una construcción, para demostrar a los clientes de una manera atractiva y sencilla que los requisitos se cumplen.

6. Potencial educativo, de investigación y aplicación en la ingeniería civil

Este apartado se desmarca del objetivo inicial en el sentido de que no guarda relación directa con la creación de una herramienta de análisis estructural. Sin embargo, tanto durante la revisión de la literatura existente y de ejemplos reales como durante el proceso de creación de la propia herramienta, se ha podido ver que siguiendo la línea de trabajo de este proyecto y mediante planteamientos similares al suyo es posible abarcar temas más diversos, con lo que se ha creído conveniente compartir el potencial intuido.

Por un lado, hay que plantearse las posibilidades docentes que se desprenden de este trabajo. Pensando en el mismo artefacto y la herramienta desarrollados, es posible imaginarse un uso de ellos durante una clase teórica de análisis de estructuras. Si bien no podría sustituir ninguna explicación, el prototipo permitiría ejemplificar los distintos casos que se estudien en el aula de una forma dinámica y atractiva gracias al funcionamiento en tiempo real de la herramienta. Hay que destacar que si el uso educativo va más allá de mostrar el artefacto y entra en la creación de nuevos prototipos, siguiendo unos pasos similares a los presentados en este trabajo, el estudiante no solamente aprendería nuevos conceptos relacionados con la monitorización y la Fabricación Digital, sino que reforzaría la teoría más pura de estructuras, puesto que esta no se pierde, siendo la base que permite la existencia de la interfaz gráfica final. Además, gracias a la versatilidad del sistema propuesto, utilizando sensores distintos y adecuando el código en Processing sería posible emplear otros artefactos e interfaces en materias docentes distintas.

Por otro lado, la otra finalidad del presente capítulo consiste en exponer ideas que podrían devenir en futuros proyectos similares al que se ha desarrollado en este trabajo, es decir, proyectos enfocados a la monitorización de la salud estructural de obras civiles pero que se beneficien de elementos provenientes de la Fabricación Digital y del movimiento *Maker* en general. Con la inclusión de este tema se pretende demostrar que la ingeniería civil aún puede sacar mucho provecho de otros campos, maximizando los recursos económicos, muchas veces escasos, y ampliando sus fronteras.

Para empezar, la idea empleada en el presente trabajo de utilizar una placa Arduino como sistema de adquisición de datos se antoja como un recurso polivalente, el cual puede ser empleado en muchos ámbitos de manera recurrente debido a su alta flexibilidad y a su precio altamente económico. De la misma forma que se ha propuesto utilizar dicha placa como un recolector de datos referentes a magnitudes físicas de una estructura sencilla, como puede ser una viga o un pórtico, también podría solucionar un problema de monitorización real a pequeña escala. Con esto se quiere decir que podría utilizarse para recoger datos similares a los buscados en el modelo creado pero en una estructura real, con lo que solamente haría falta cambiar la escala de los sensores, empleando dispositivos más robustos en todos los sentidos. Cabe destacar que este cambio no debería suponer un problema, ya que como se ha expuesto en el subapartado relacionado con los sensores, la tecnología actual permite trabajar con células de carga que operan con grandes fuerzas o con sensores de distancia capaces de cubrir

grandes longitudes de forma precisa, entre otros ejemplos. De esta forma, se puede pensar en monitorizar cargas en puntos específicos, como en las uniones de elementos o en las bases de las estructuras, o en controlar distancias entre dos puntos concretos. Esta última idea, la capacidad de conocer cuánto se ha movido un punto de una estructura respecto a una referencia, permitiría de forma sencilla tener monitorizada la deflexión de una viga o un tablero. Así pues, la implementación de un sistema similar al ideado pero en casos reales nos puede llevar a posibles monitorizaciones en edificios de una sola planta como naves industriales o centros multiusos, en puentes, grúas, o incluso edificios de varias plantas, siempre tras validarlo mediante los estudios pertinentes.

Hay que resaltar que el uso de los dispositivos Arduino, o en su defecto productos similares producidos por otras empresas, nos limita el número de sensores a emplear según el número de pines de entrada de los que la placa disponga. La solución lógica a esta restricción no es más que el empleo de tantos dispositivos de adquisición como requiera el proyecto, pero hay que pensar que el uso de una placa como la de Arduino debería estar enfocado a proyectos pequeños, donde la inmediatez y la economía priman. Por otro lado, si la monitorización se va a llevar a cabo en grandes infraestructuras, con muchos datos a conocer requeridos, seguramente la solución óptima pase por la utilización de tecnología diseñada específicamente para ese fin. De todas formas, incluso en estos grandes proyectos, Arduino permitiría crear los primeros prototipos, que más adelante darán pie a circuitos específicos. En este mismo sentido, es necesario remarcar la habilidad que tiene esta placa para repetir una tarea determinada, en este caso recoger y enviar información, pero su poca capacidad para trabajar como un ordenador, procesando los datos para conseguir resultados ingenieriles. No obstante, el movimiento Maker aporta soluciones también para este problema: si lo que se quiere es incluir en la última etapa del sistema de adquisición un elemento capaz de tratar la información, que no implique un alto precio pero que haga las veces de un ordenador, los productos Raspberry Pi o Cubieboard son alternativas a tener en cuenta.

Si se busca ampliar los campos de aplicación de la simbiosis Fabricación Digital - Ingeniería Civil es necesario tener presente la gran variedad de sensores que proporciona hoy en día la electrónica. Beneficiándonos de la sencillez de cualquier placa similar a la utilizada o de los miniordenadores expuestos en el parágrafo anterior, es cuestión de encontrar los dispositivos adecuados que nos permitan captar aquellas magnitudes físicas que sean cruciales para controlar un proceso concreto. Dos ejemplos que podrían desarrollarse y que parten de la posibilidad, por parte de cualquier cliente, de adquirir los sensores necesarios por unos precios bajos se presentan a continuación:

- Un primer ejemplo se basa en monitorizar la humedad existente en un ambiente concreto. Para captar esta magnitud es posible encontrar sensores que aporten resultados aceptables por un valor inferior a 10€, sabiendo que si la inversión económica a realizar es superior a este precio tan bajo, los resultados pueden verse mejorados. La idea de emplear dichos sensores, los higrómetros, está pensada sobre todo para ser implementada en fases de construcción, por ejemplo para encontrar el momento y las proporciones óptimas a la hora de realizar un hormigonado. También durante la fase constructiva pero en este caso para compactar de forma óptima un suelo, un sistema sencillo formado por una placa

Arduino y varios sensores de humedad bien distribuidos serían capaces de obtener la magnitud de interés, mejorando así las prestaciones futuras y su durabilidad. Antes de acabar se debe explicar que aunque la finalidad es la misma, para ambas monitorizaciones será necesario utilizar distintos sensores, unos capaces de analizar el aire del ambiente y otros capaces de obtener información de un material concreto.

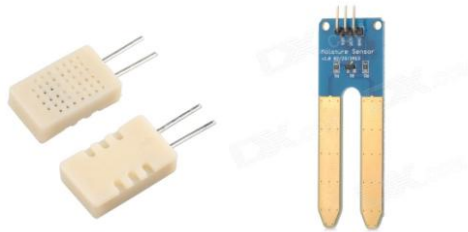


Fig. 50 Higrómetro para detectar la humedad del ambiente, a la izquierda, e higrómetro para monitorizar suelos, a la derecha

<http://www.dx.com> [42]

- El segundo ejemplo hace uso de dispositivos capaces de captar vibraciones, los llamados acelerómetros. Actualmente se pueden comprar estos sensores por valores en torno a los 20€ (Fig.51), o incluso menos, una forma barata de captar movimiento tridimensional y que además es muy sencilla de utilizar. Un primer uso que se le puede dar es la monitorización de puntos estratégicos de una estructura, en los cuales el movimiento puede avisar de situaciones anómalas o incluso peligrosas. Las partes más altas de las torres encargadas de sostener un puente atirantado, o los puntos de una viga donde se espera que la deformada sea máxima, por ejemplo, podrían ser lugares adecuados donde emplear estos sensores. No obstante, yendo un paso más lejos, es posible que estos acelerómetros de bajo coste permitan detectar el daño global de una estructura. Hay que recalcar que son de bajo coste, lo que seguramente implique que su fiabilidad no es la máxima posible con la tecnología disponible actualmente, pero habría que estudiarlos con detención para poder descartarlos completamente a la hora de detectar formas modales en las vibraciones de una estructura. Si los estudios resultasen positivos, el deterioro global de grandes estructuras podría controlarse con métodos relativamente avanzados pero partiendo de presupuestos muy bajos.

Sin embargo, la Fabricación Digital no sólo puede aportar sensores accesibles a cualquier usuario y colectores de datos y microordenadores muy versátiles como las placas vistas anteriormente. Entre las tecnologías que engloba este campo se encuentran algunos avances capaces de resolver los posibles problemas, quizá más prácticos, que puedan surgir a la hora de implementar un sistema de SHM. En concreto, se quiere hacer referencia a las tecnologías de fabricación aditivas y sustractivas, que permitirán crear todo tipo de formas, unas más simples usando recortadoras mecánicas o láser, por ejemplo, y aquellas que sean

más complicadas mediante la impresión 3D. La primera aplicación práctica que se puede ocurrir es la creación de soportes para los distintos elementos del sistema de monitorización, de forma que la instalación de estos pueda llevarse a cabo de la forma más adecuada, mejorando la sujeción o simplemente permitiéndola cuando se trabaja con infraestructuras de geometrías extrañas. De esta forma, será posible captar magnitudes desde los puntos de máximo interés, sea cual sea su situación dentro de la estructura y sin dañar los sensores al sujetarlos con clavos, masillas o cualquier otro método, transmitiendo los posibles daños o desperfectos a los objetos de fijación creados con las tecnologías de fabricación de vanguardia.



Fig. 51 Acelerómetro de tres ejes

<http://www.dx.com> [42]

Profundizando un poco más en el tema de crear objetos cuya función es soportar o llevar en su interior tanto sensores como dispositivos de adquisición de datos, el siguiente paso lógico es el de incluir el factor de protección. Esto es, aprovechar que dichos objetos son creados específicamente para cada proyecto y tener en cuenta, a la hora de escoger los materiales y las distintas partes que lo formarán, si el entorno en el que se va a trabajar incluye elementos de los cuales es mejor tener alejados a todos los componentes de nuestro sistema. En primera instancia, parece interesante crear los soportes de tal forma que el viento y las partículas de polvo afecten lo menos posible al contenido de estos, incrementando así su vida útil y reduciendo costes. Además, si se consigue crear soportes con un grado de hermetismo tal que sea capaz de evitar la entrada de humedad, o al menos reducirla de forma considerable, se logrará implementar sistemas de SHM en ambientes agresivos, llegando a monitorizar estructuras costeras y marinas, a modo de ejemplo. En el mismo sentido, si se llega a fabricar un objeto que optimice la circulación de aire, reduciendo con ella la temperatura de su interior, también podrán monitorizarse de forma más eficiente estructuras situadas en zonas con climas muy cálidos. Finalmente, si a partir de las tecnologías expuestas se logra impermeabilizar totalmente los dispositivos electrónicos necesarios, el abanico de posibilidades vuelve a expandirse por las disciplinas de la ingeniería civil.

Gracias a unos soportes-protecciones impermeables, sea cual sea la forma en que estos se construyan, la monitorización de magnitudes se puede trasladar a un ambiente acuático, pudiendo trabajar ahora tanto en ríos como en la costa o en mar abierto. Antes de nada, hay que explicar que seguramente existan versiones impermeables de la gran mayoría de sensores, pero que estas están pensadas para grandes proyectos y se alejan del factor económico y de disponibilidad que persigue este apartado. De esta manera, el único esfuerzo

extra que implica la impermeabilidad radica en la fabricación del elemento cobertor, el cual por definición de las tecnologías empleadas en su creación debe estar al alcance de todos los interesados. Con todo esto, el hecho de trabajar en contacto con el agua no sólo permite medir magnitudes como las ya vistas, sino que se debe aprovechar para medir aquellas intrínsecas de este medio como velocidades, caudales, niveles, turbulencia, nivel medio, alturas de ola, o cualquier otra que pueda ocurrirse. Para estas mediciones debe pensarse en sensores típicos y fáciles de encontrar como los de distancia, sensores de velocidad y sensores de desplazamiento mecánico, combinando los tres y, quizá, añadiendo alguno para magnitudes más concretas. Estas primeras mediciones permitirían caracterizar el comportamiento, al menos el instantáneo, de grandes masas de agua como los ríos o el mar, pero también hay que tener presente que ofrecen la posibilidad de monitorizar casos más concretos. Como ya se ha dicho, hay que pensar en estructuras más bien pequeñas y que requieran sistemas abordables con los dispositivos cercanos a la Fabricación Digital, pero aún así es posible encontrar casos que ejemplifiquen estas características y en los que la monitorización pueda aportar grandes beneficios. A continuación se muestran dos ejemplos de posible implantación en un medio acuático, ambos pensados para la misma estructura: un pequeño puente que salve un río. Al tratarse de un puente de pequeñas dimensiones, lo más probable es que no se haya planteado la implantación de un sistema de SHM paralela a la propia construcción, lo que no quiere decir necesariamente que este no sea necesario.

- Una primera idea consiste en controlar la distancia que separa el tablero del puente, o cualquier otro punto fijo de la estructura, del lecho del río que rodea las pilas. Si fuera posible conocer esta magnitud, los responsables de esta infraestructura podrían tener una idea más definida del grado de seguridad bajo el que se encuentra el puente, ya que la erosión que puede causar el río con su régimen habitual o con avenidas, menos frecuentes pero mucho más dañinas, es un factor crucial para la estabilidad general. A la hora de escoger los sensores habría que decantarse por unos capaces de medir distancias, pero teniendo en cuenta que deben llegar hasta el lecho sólido sin verse influenciados por el nivel variable del agua. Teniendo en cuenta que sería preciso realizar estudios para validar su fiabilidad, una primera propuesta es el empleo de sensores ultrasónicos.
- Pensando en la misma estructura, pero en este caso relacionado con el nivel del agua, sería interesante implantar un sistema capaz de avisar cuando dicho nivel es peligroso para la estabilidad y para los usuarios. Para este sistema de monitorización interesaría un sensor que avise cuando el agua alcance una altura previamente definida, para lo que una boya podría ser útil, ya que existen muchos métodos que indiquen que esta ha llegado al punto marcado. Hay que decir que un sistema de estas características tiene más sentido en ríos mediterráneos, donde las avenidas son repentinas y representan crecidas muy grandes en comparación al régimen habitual. En este mismo sentido, el sistema debe trabajar a tiempo real, de forma que pueda avisar en el momento en el que el peligro es inminente empleando alguna sirena o alguna señal luminosa.

7. Conclusiones

Después de la realización del presente trabajo se puede afirmar que la ingeniería civil aún cuenta con áreas novedosas a investigar y, sobretodo, a explotar en casos reales. Si a este hecho se le añade la posibilidad de trabajar con nuevas tecnologías, las soluciones a los distintos problemas serán cada vez más variadas y permitirán así ganar en eficiencia, adaptándose a las necesidades de cada caso concreto.

Centrando la atención en la Fabricación Digital, hay que remarcar que se trata de un concepto muy amplio, ya que engloba y relaciona muchas disciplinas. De todas formas, a la hora de aplicar las ideas relacionadas con dicho concepto, su principal atractivo recae en lo muy asequible y accesible que resulta la tecnología que requieren. Dicho en otras palabras, debido al bajo coste que implica adquirir tanto los dispositivos electrónicos necesarios como el *software* demandado, y gracias también a la facilidad de encontrar todos los elementos: hoy en día existe una amplia oferta comercial de aparatos electrónicos y la filosofía del programario libre es intrínseca a este ámbito, la Fabricación Digital se ha convertido en una herramienta al alcance de cualquier usuario. En consecuencia, si se trata de un recurso tan universal, relativamente barato y de fácil obtención, su incorporación a la ingeniería no debería ceñirse únicamente al laboratorio, sino que podría ser de gran ayuda tanto desde el punto de vista docente como pensando en su implementación en proyectos constructivos en desarrollo.

Por otro lado, cuando se habla de estas tecnologías de vanguardia aplicadas a la ingeniería es preciso destacar también la rapidez con la que surgen los resultados. Como cualquier otra materia, la Fabricación Digital requiere de un aprendizaje y de cierta experiencia, pero este caso es sorprendente porque tras iniciarse en los conceptos más básicos, cualquier desarrollador puede realizar proyectos pequeños pero a la vez útiles, siempre que se escojan los elementos adecuados. A todo esto hay que añadirle que los proyectos se elaboran de forma autónoma, aunque se trabaje en grupo, ya que se utilizan recursos propios, sin depender de terceros, un hecho que unido a la naturaleza de las tecnologías con las que se trabaja hace que la aplicabilidad de los resultados sea prácticamente instantánea. Estas características refuerzan aún más el potencial de la Fabricación Digital fuera del laboratorio.

Si además de la Fabricación Digital se tiene en mente el campo ingenieril de la monitorización de estructuras, los dos conceptos que forman el binomio en torno al cual gira todo este trabajo, el gran abanico de soluciones del que se hablaba previamente se concreta en un sistema muy determinado. Para poder controlar los distintos parámetros de interés de una construcción, tal y como se ha hecho con el modelo a escala aquí fabricado, hay que tener claros tres puntos esenciales que conforman el sistema final: los sensores, el sistema de adquisición de datos y la interfaz gráfica de usuario. Estos tres subsistemas, sin importar el tipo de estructura que se esté estudiando ni las magnitudes que se quieran monitorizar, funcionarán siempre de la misma manera:

- Para empezar, es necesario captar los estímulos físicos característicos, para lo que se debe disponer una red de sensores adecuada a la demanda. Los dispositivos que aquí se han utilizado son muy sencillos, pero aún así cumplen su función perfectamente dentro del proyecto. Esto nos lleva al tema de la calidad y de la capacidad, es decir, el rigor con el que trabaja cada aparato y el orden de magnitud con el que puede lidiar. Existe una amplia gama de sensores, variables en las dos características anteriores, por lo que siempre hay que tener en cuenta antes de usar un modelo u otro la demanda de nuestro proyecto. De esta forma, es posible trasladar la misma red empleada en una monitorización pequeña, o incluso la empleada en el modelo creado, a la monitorización de una gran estructura, pero empleando sensores con mejores prestaciones. Esto implicaría irremediablemente un incremento del presupuesto necesario, pero dicho aumento en el gasto es asumible cuando se trata de grandes proyectos de monitorización.
- El segundo punto esencial es el sistema de adquisición de datos, entendido como el dispositivo que permite el paso del mundo físico al mundo digital, recogiendo la información captada por los sensores y tratándola de forma adecuada, sin alterarla o perder parte de ella. En este trabajo se ha empleado una placa Arduino, pero se debe tener en cuenta que otras empresas también ofrecen productos muy similares, capaces de cumplir las mismas funciones, y que en definitiva pueden ser empleados de la misma forma que se ha trabajado con esta placa. Sea como sea, hay que destacar la versatilidad de cualquier placa de características similares a la utilizada en relación a su bajo precio, ya que pueden adaptarse prácticamente a cualquier proyecto, soportando sensores de todas las clases y transfiriendo información de forma muy eficiente. Es preciso añadir que su potencial no reside únicamente en lo hasta ahora expuesto, hay que tener presente que estos dispositivos son igualmente capaces de comunicarse sin cables, que puede ser necesario en muchas situaciones, o de enviar órdenes. Esta última posibilidad, la de enviar ordenes y no sólo recibir datos de los sensores, puede abrir nuevos caminos de investigación, ya que significa que después de tomar las decisiones oportunas en respuesta a las magnitudes captadas, este mismo sistema que aquí se defiende permitiría desde encender un LED hasta mover un motor, con todas la aplicaciones que eso implica.
- La última pata del sistema es la interfaz gráfica de usuario, el elemento que acerca todo el proceso de monitorización hasta los responsables gracias a información visual y sencilla a través de una pantalla. Se puede decir que es el resultado final de un programa que trabaja con todos los datos adquiridos, procedentes del sistema de adquisición de datos, y les da un sentido ingenieril, pero su importancia nace del hecho de que el usuario no necesita realizar el postproceso de una larga base de datos, al contrario, lo que le llega es directamente la información definitiva que precisa. Todo esto, añadido además a la forma de trabajar de la placa Arduino, permite introducir el concepto de tiempo real, muy importante en la construcción porque permite adelantarse a los posibles problemas que puedan surgir y tomar decisiones mucho más efectivas. De esta manera, siempre que tenga sentido dentro del proyecto hay que intentar trabajar en tiempo real, analizando y mostrando todo lo que sucede en ese

instante en la estructura. Por último, y para sintetizar, hay que remarcar de nuevo que la interfaz gráfica de usuario es lo único que verá un futuro responsable de la construcción, por lo que se debe crear una pantalla con la información esencial, mostrando esquemas y gráficas muy clarificadoras de la situación real y de manera simple, para que con un solo vistazo sea posible detectar una anomalía o un error.

Es muy importante ver que tras entender y asimilar cada uno de los tres elementos principales que aquí se proponen para formar un sistema de Monitorización de la Salud Estructural, y también comprendiendo la relación que los une, es posible extrapolar todo el entramado a cualquier proyecto de monitorización. Si bien hay que adaptar muchos de los elementos a los requisitos específicos, como ya se ha ido viendo, la idea central permanece invariable y únicamente hay que reproducirla de nuevo. Para finalizar, la comprensión de la manera de trabajar de este sistema nos lleva asimismo a un concepto más amplio, conocido como internet de las cosas, y que sencillamente es la comunicación mediante internet entre objetos, los cuales comparten información útil preestablecida por un humano. Si se menciona aquí este concepto es porque básicamente es lo que ocurre en el sistema propuesto, con lo que tomando aún más perspectiva podrían encontrarse aplicaciones que se alejen de la monitorización en sí y que aporten nuevas competencias a la ingeniería civil, pero siempre siguiendo un esquema similar al presente sistema.

8. Referencias

- [1] Sohn Hoon, Farrar Charles R., Hemez Francois, Czarnecki Jerry. (Enero 2002). A Review of Structural Health Monitoring Literature 1996 – 2001. Los Alamos National Laboratory report in preparation [online], LA-UR-02-2095
- [2] Quintero Parra Andrés Felipe, Villamizar Mejía Rodolfo. (Junio 2010). Estado del arte en Monitorización de Salud Estructural: un enfoque basado en Agentes Inteligentes. Ciencia e Ingeniería Neogranadina [online], Volume 20, Pages 117-132, ISSN 0124-8170
- [3] Abdel-Basset Abdo Mohamed. (2014). Structural Health Monitoring, History, Applications and Future. A Review Book. New York: Open Science Publishers, ISBN: 978-1-941926-07-9
- [4] Rytter Anders. (1993). Vibration Based Inspection of Civil Engineering Structures. PhD thesis, Department of Building Technology and Structural Engineering, University of Aalborg, Denmark. Fracture and Dynamics, no. 44, vol. R9314
- [5] TYP Mediciones. Vibrómetros.
Consultada el 31 de Mayo de 2016, en <http://www.typmediciones.com/vibrometros.html>
- [6] Chang Fu-Kuo. (Septiembre 2003). Structural Health Monitoring. Lancaster, Pennsylvania: DEStech Publications, Inc., ISBN: No. 1-932078-20-7
- [7] National Instruments. ¿Qué es Adquisición de Datos?.
Consultada el 21 de Agosto de 2016, en <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/>
- [8] Li Hui, Ou Jinping, Zhao Xuefeng, Zhou Wensong, Li Hongwei, Zhou Zhi. (2006). Structural Health Monitoring System for the Shandong Binzhou Yellow River Highway Bridge. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Volume 21, Pages 306–317, doi: 10.1111/j.1467-8667.2006.00437.x
- [9] Liu Donghai, Wu You, Li Shuai, Sun Yuanze (Marzo 2016). A real-time monitoring system for lift-thickness control in highway construction. Automation in Construction, Volume 63, Pages 27-36, ISSN 0926-5805, <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2015.12.004>.
- [10] Liu Donghai, Lin Min, Li Shuai. (Febrero 2016). Real-Time Quality Monitoring and Control of Highway Compaction. Automation in Construction, Volume 62, Pages 114-123, ISSN 0926-5805, <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2015.11.007>.
- [11] Al Handawi Khalil, Vahdati Nader, Rostron Paul, Lawand Lydia, Shirayayev Oleg. (29 Noviembre 2016). Strain based FBG sensor for real-time corrosion rate monitoring in pre-stressed structures. Sensors and Actuators B: Chemical, Volume 236, Pages 276-285, ISSN 0925-4005, <http://dx.doi.org/10.1016/j.snb.2016.05.167>.

- [12] Lin Tzu-Kang, Chang Yu-Shian. (1 Enero 2017). Development of a real-time scour monitoring system for bridge safety evaluation. Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 82, Pages 503-518, ISSN 0888-3270, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.05.040>.
- [13] Helmi Karim, Taylor Todd, Zarafshan Ali, Ansari Farhad. (15 Noviembre 2015). Reference free method for real time monitoring of bridge deflections. Engineering Structures, Volume 103, Pages 116-124, ISSN 0141-0296, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.09.002>.
- [14] Lazo Christian, Gallardo Paulo, Céspedes Sandra. (2015). A Bridge Structural Health Monitoring System Supported by the Internet of Things. IEEE COLCOM 2015, 978-1-4799-8834-1/15/\$31.00
- [15] Fox Stephen. (2014). Third Wave Do-It-Yourself (DIY): Potential for prosumption, innovation, and entrepreneurship by local populations in regions without industrial manufacturing infrastructure. Technology in Society, Volume 39(11), Pages 11-30, <http://dx.doi.org/10.1016/j.techsoc.2014.07.001>
- [16] Lee Martin. (2015). The promise of the Maker Movement for Education. Journal of Pre-College Engineering Education Research (J-PEER), Volume 5(1), Pages 30-39, <http://dx.doi.org/10.7771/2157-9288.1099>
- [17] Velasco JJ. (Mayo 2013). 5 proyectos de hardware libre que vale la pena conocer. Consultada el 9 de Mayo de 2016, en <http://hipertextual.com/2013/05/5-proyectos-de-hardware-libre-para-conocer>
- [18] Arduino, <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>
- [19] Free Software Foundation. (2016). ¿Qué es el software libre?. Consultada el 10 de Mayo de 2016, en <http://www.gnu.org/philosophy/free-sw.es.html>
- [20] Camins Makers, <http://caminsmakers.upc.edu/>
- [21] Arduino Project Hub, <https://create.arduino.cc/projecthub>
- [22] Processing, <https://processing.org/>
- [23] Sánchez Susana. (Abril 2015). Impresión 3D por Estereolitografía, te explicamos todo !. Consultada el 26 de Mayo de 2016, en <http://www.3dnatives.com/es/impresion-3d-por-estereolitografia-les-explicamos-todo/>
- [24] Stratasys. Tecnologías de impresión 3D de Stratasys. Consultada el 26 de Mayo de 2016, en <http://www.stratasys.com/es/impresoras-3d/technologies>
- [25] The Great Project. El hardware libre en la impresión 3D doméstica. Consultada el 26 de Mayo de 2016, en <http://thegreatiproject.com/el-hardware-libre-en-la-impresion-3d-domestica/>

- [26] Linares Clemente Pedro. (Enero 2015). La bioimpresión 3D de tejidos y órganos nos acerca al futuro de la medicina regenerativa.
Consultada el 26 de Mayo de 2016, en <http://comunicarciencia.bsm.upf.edu/?p=1468>
- [27] Civilgeeks. Tecnología de impresión 3D para elementos estructurales.
Consultada el 26 de Mayo de 2016, en <http://civilgeeks.com/2011/04/09/tecnologia-de-impresion-3d-para-elementos-estructurales/>
- [28] TIKOA. Impresión 3D en la ingeniería civil.
Consultada el 26 de Mayo de 2016, en <http://impresiontresde.com/blog/impresion-3d-en-la-ingenieria-civil/>
- [29] Glowforge, <http://glowforge.com>
- [30] Camilo Afonso Alves Basto. (2015). Study on possibilities on low-cost monitoring of historical structures. Master's thesis, Advanced masters in structural analysis of monuments and historical constructions.
- [31] Ena Lloret, Amir R. Shahab, Mettler Linus, Robert J. Flatt, Fabio Gramazio, Matthias Kohler, Silke Langenberg (2015). Complex concrete structures: Merging existing casting techniques with digital fabrication, Computer-Aided Design, Volume 60, Pages 40-49, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2014.02.011>.
- [32] Jan Willmann, Michael Knauss, Tobias Bonwetsch, Anna Aleksandra Apolinarska, Fabio Gramazio, Matthias Kohler (2016). Robotic timber construction — Expanding additive fabrication to new dimensions. Automation in Construction, Volume 61, Pages 16-23, <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2015.09.011>.
- [33] J.M. Gattas, Z. You (2016). Design and digital fabrication of folded sandwich structures. Automation in Construction, Volume 63, Pages 79-87, <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2015.12.002>.
- [34] Chacón R., Oller S. (2016). Designing experiments using Digital Fabrication in Structural Dynamics. Accepted for publication at *J. Prof. Issues Eng. Educ. Pract (ASCE)*.
- [35] Canet Juan Miquel. (Septiembre 2012). Resistencia de Materiales y Estructuras. Barcelona: CIMNE [digital], ISBN: 978-84-939640-4-7
- [36] Electrónica Estudio. ¿qué es un microcontrolador?.
Consultada el 7 de Junio de 2016, en <http://www.electronicaestudio.com/microcontrolador>
- [37] Treegic. (Septiembre 2015). Arduino UNO: ¿cómo funciona la famosa placa de Arduino?.
Consultada el 7 de Junio de 2016, en <http://www.treegicmagazine.com/geek/arduino-uno-como-funciona-la-famosa-placa-de-arduino/>
- [38] Prometec, <http://www.prometec.net/producto-categoria/arduinos/>

[39] Wiki de Robótica. Sensor de infrarrojos.

Consultada el 8 de Junio de 2016, en <http://wiki.robotica.webs.upv.es/wiki-de-robotica/sensores/sensores-proximidad/sensor-infrarrojos/>

[40] Teslabem. FSR Sensor de Fuerza Resistivo Circular de 0.6".

Consultada el 9 de Junio de 2016, en <https://teslabem.com/index.php/catalog/product/view/id/102/s/>

[41] Area Tecnología. Potenciómetro.

Consultada el 20 de Agosto de 2016, en <http://www.areatecnologia.com/electronica/potenciometro.html>

[42] Deal Extreme, <http://www.dx.com>

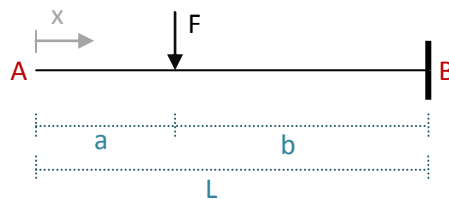
[43] Innovae, <http://www.innovae.eu/>

9. Anejos

Aquí se presentan las fórmulas incluidas en el código desarrollado para la herramienta de análisis, concretamente las que hacen referencia al análisis en régimen elástico de vigas y pórticos. Otros datos que aparecen en el programa, por ejemplo valores máximos de momentos y de desplazamientos, se consiguen a partir de las ecuaciones aquí presentadas.

9.1. Vigas

Viga en voladizo con fuerza puntual



Reacciones:

$$R_B = F$$

$$M_B = -Fb$$

Cortantes:

$$V_{AC} = 0$$

$$V_{CB} = -F$$

Momentos flectores:

$$M_{AC} = 0$$

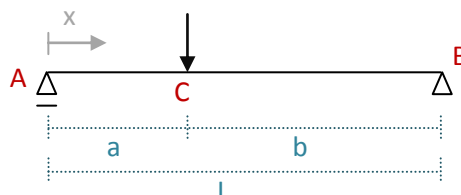
$$M_{CB} = -F(x - a)$$

Desplazamientos:

$$y_{AC} = \frac{Fb^2}{6EI} [3(L - x) - b]$$

$$y_{CB} = \frac{F}{6EI} (L - x)^2 (2b - a + x)$$

Viga simplemente apoyada con fuerza puntual



Reacciones:

$$R_A = \frac{Fb}{L}$$

$$R_B = \frac{Fa}{L}$$

Cortantes:

$$V_{AC} = \frac{Fb}{L}$$

$$V_{CB} = -\frac{Fa}{L}$$

Momentos flectores:

$$M_{AC} = \frac{Fb}{L}x$$

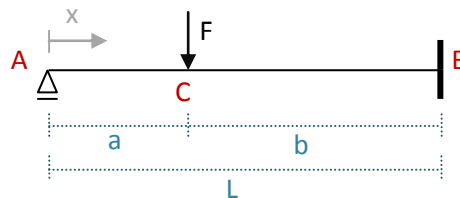
$$M_{CB} = \frac{Fa}{L}(L-x)$$

Desplazamientos:

$$y_{AC} = \frac{FLbx}{6EI} \left[1 - \frac{b^2}{L^2} - \frac{x^2}{L^2} \right]$$

$$y_{CB} = \frac{FLa(L-x)}{6EI} \left[1 - \frac{a^2}{L^2} - \frac{(L-x)^2}{L^2} \right]$$

Viga apoyada-empotrada con fuerza puntual



Reacciones:

$$R_A = \frac{Fb^2}{2L^3}(3L-b)$$

$$R_B = \frac{Fa}{2L^3}(3L^2 - a^2)$$

$$M_B = -\frac{Fa}{2L^2}(L^2 - a^2)$$

Cortantes:

$$V_{AC} = \frac{Fb^2}{2L^3}(3L-b)$$

$$V_{CB} = -\frac{Fa}{2L^3}(3L^2 - a^2)$$

Momentos flectores:

$$M_{AC} = \frac{Fb^2x}{2L^3}(3L-b)$$

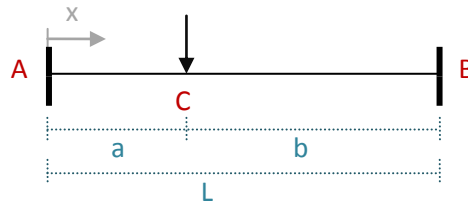
$$M_{CB} = \frac{Fa}{2L^3}(2L^3 - 3L^2x + a^2x)$$

Desplazamientos:

$$y_{AC} = \frac{Fb^2x}{12EIL^3}[3aL^2 - x^2(2L+a)]$$

$$y_{CB} = \frac{Fa(L-x)^2}{12EI} \left[3 \left(1 - \frac{a^2}{L^2} \right) - \left(3 - \frac{a^2}{L^2} \right) \frac{L-x}{L} \right]$$

Viga biempotrada con fuerza puntual



Reacciones:

$$R_A = \frac{Fb^2}{L^3} (2a + L)$$

$$R_B = \frac{Fa^2}{L^3} (2b + L)$$

$$M_A = -\frac{Fab^2}{L^2}$$

$$M_B = -\frac{Fa^2b}{L^2}$$

Cortantes:

$$V_{AC} = \frac{Fb^2}{L^3} (2a + L)$$

$$V_{CB} = -\frac{Fa^2}{L^3} (2b + L)$$

Momentos flectores:

$$M_{AC} = \frac{Fb^2}{L^3} (Lx + 2ax - aL)$$

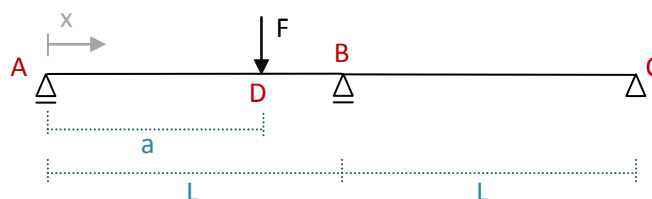
$$M_{CB} = \frac{Fa^2}{L^3} (Lb + L^2 - Lx - 2bx)$$

Desplazamientos:

$$y_{AC} = \frac{Fb^2}{6EI} \left[3a - x - \frac{2ax}{L} \right] \frac{x^2}{L^2}$$

$$y_{CB} = \frac{Fa^2}{6EI} \left[3b - (L-x) - 2b \frac{L-x}{L} \right] \frac{(L-x)^2}{L^2}$$

Viga continua de dos vanos iguales simplemente apoyada con fuerza puntual



Para $0 \leq a \leq L$

Reacciones:

$$R_A = \frac{F}{4L^3}(4L^3 - 5L^2a + a^3)$$

$$R_B = \frac{Fa}{2L^3}(3L^2 - a^2)$$

$$R_C = -\frac{Fa}{4L^3}(L^2 - a^2)$$

Cortantes:

$$V_{AD} = R_A$$

$$V_{DB} = \frac{Fa}{4L^3}(a^2 - 5L^2)$$

$$V_{BC} = -R_C$$

Momentos flectores:

$$M_{AD} = \frac{F}{4L^3}(4L^3 - 5L^2a + a^3)x$$

$$M_{DB} = \frac{Fa}{4L^3}(a^2 - 5L^2)x + Fa$$

$$M_{BC} = \frac{Fa}{4L^3}(L^2 - a^2)(x - 2L)$$

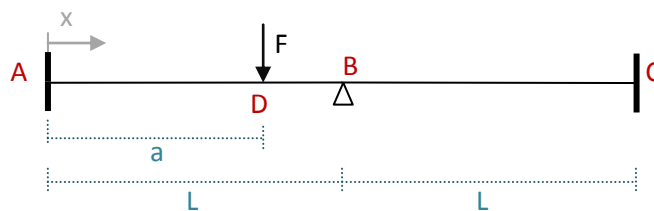
Desplazamientos:

$$y_{AD} = \frac{R_A}{6EI}x^3 + \frac{x}{EI}\left[\frac{F(L-a)^3}{6L} - \frac{R_AL^2}{6}\right]$$

$$y_{DB} = \frac{R_A}{6EI}x^3 - \frac{F(x-a)^3}{6EI} + \frac{x}{EI}\left[\frac{F(L-a)^3}{6L} - \frac{R_AL^2}{6}\right]$$

$$y_{BC} = \frac{R_A}{6EI}x^3 - \frac{F(x-a)^3}{6EI} + \frac{R_B(x-L)^3}{6EI} + \frac{x}{EI}\left[\frac{F(L-a)^3}{6L} - \frac{R_AL^2}{6}\right]$$

Viga continua de dos vanos iguales biempotrada y simplemente apoyada en el centro con fuerza puntual



Para $0 \leq a \leq L$

Reacciones:

$$R_A = \frac{F}{4L^3} [4L^3 - 9a^2L + 5a^3]$$

$$R_B = \frac{Fa^2}{L^3} (3L - 2a)$$

$$R_C = -\frac{F}{4L^3} [3La^2 - 3a^3]$$

$$M_A = \frac{R_B L}{4} - Fa \left(1 - \frac{a}{L} + \frac{a^2}{4L^2} \right)$$

$$M_C = M_A + R_A 2L - F(2L - a) + R_B L$$

Cortantes:

$$V_{AD} = R_A$$

$$V_{DB} = \frac{Fa}{4L^3} (5a^3 - 9a^2L)$$

$$V_{BC} = -R_C$$

Momentos flectores:

$$M_{AD} = \frac{F}{4L^3} [4L^3 - 9a^2L + 5a^3]x + M_A$$

$$M_{DB} = \frac{F}{4L^3} [5a^3 - 9a^2L]x + Fa + M_A$$

$$M_{BC} = \frac{F}{4L^3} [3a^2L - 3a^3]x + Fa + \frac{Fa^2}{L^3} (2aL - 3L^2) + M_A$$

Desplazamientos:

$$y_{AD} = \frac{R_A x^3}{6EI} + \frac{M_A x^2}{2EI}$$

$$y_{DB} = \frac{R_A x^3}{6EI} - \frac{F(x-a)^3}{6EI} + \frac{M_A x^2}{2EI}$$

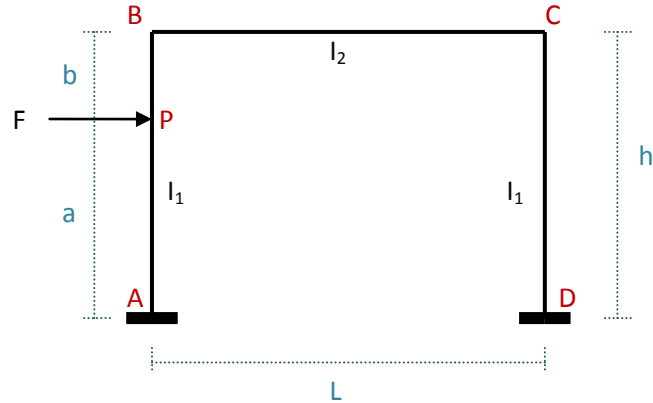
$$y_{BC} = \frac{R_A x^3}{6EI} - \frac{F(x-a)^3}{6EI} + \frac{R_B(x-L)^3}{6EI} + \frac{M_A x^2}{2EI}$$

9.2. Pórticos

$$k = \frac{I_2 h}{I_1 L}$$

Donde I_1 y I_2 son los momentos de inercia de las secciones de las columnas y de la viga respectivamente.

Fuerza puntual horizontal aplicada en una columna



Reacciones:

$$V_A = V_D = \frac{3Fa^2k}{hL(6k+1)}$$

$$H_A = F - H_D$$

$$H_D = \frac{Fab}{2h^3} \left(\frac{h^2}{b} - \frac{h+b+(2b-h)k}{k+2} \right)$$

Momentos flectores:

$$M_A = -\frac{Fa}{2h} \left(h + \frac{b(h+b+bk)}{h(k+2)} - \frac{3ak}{6k+1} \right)$$

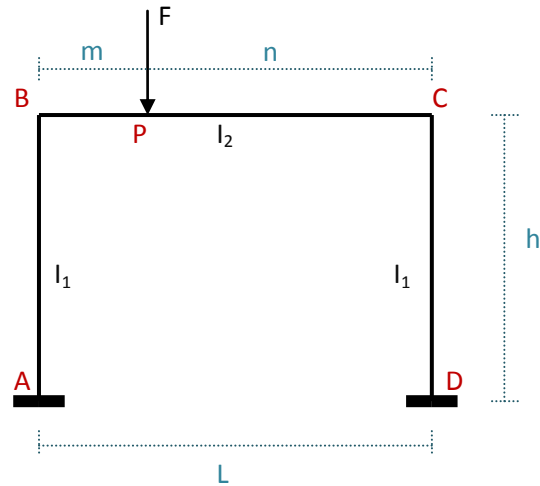
$$M_B = \frac{Fa^2}{2h} \left(\frac{3k}{6k+1} - \frac{bk}{h(k+2)} \right)$$

$$M_C = -\frac{Fa^2}{2h} \left(\frac{3k}{6k+1} + \frac{bk}{h(k+2)} \right)$$

$$M_D = \frac{Fa}{2h} \left(h - \frac{b(h+b+bk)}{h(k+2)} - \frac{3ak}{6k+1} \right)$$

$$M_P = \frac{Fab}{h} + \frac{bM_A}{h} + \frac{aM_B}{h}$$

Fuerza puntual vertical aplicada en la viga



Reacciones:

$$V_A = \frac{Fn}{L} \left(1 + \frac{m(n-m)}{L^2(6k+1)} \right)$$

$$V_D = F - V_A$$

$$H_A = H_D = \frac{3Fmn}{2Lh(k+2)}$$

Momentos flectores:

$$M_A = \frac{Fmn}{2L} \left(\frac{L}{k+2} - \frac{n-m}{L(6k+1)} \right)$$

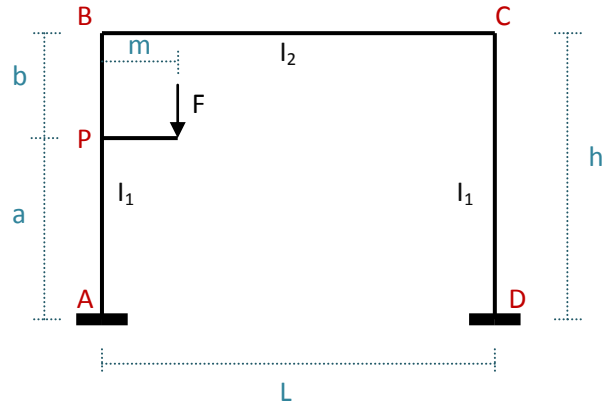
$$M_B = -\frac{Fmn}{L} \left(\frac{L}{k+2} + \frac{n-m}{2L(6k+1)} \right)$$

$$M_C = -\frac{Fmn}{L} \left(\frac{L}{k+2} - \frac{n-m}{2L(6k+1)} \right)$$

$$M_D = \frac{Fmn}{2L} \left(\frac{L}{k+2} + \frac{n-m}{L(6k+1)} \right)$$

$$M_P = \frac{Fmn}{L} + \frac{nM_B}{L} + \frac{mM_C}{L}$$

Fuerza puntual vertical aplicada en un voladizo unido a una columna



Reacciones:

$$V_A = F - V_D$$

$$V_D = \frac{6Fmak}{hL(6k+1)}$$

$$H_A = H_D = \frac{3Fma}{2h^3} \frac{h+b+2bk}{k+2}$$

Momentos flectores:

$$M_A = \frac{Fm}{2h^2(k+2)} [-3b^2 - h^2 + (h^2 - 3b^2 - 2ah)k] + \frac{3Fmak}{h(6k+1)}$$

$$M_B = \frac{Fmka}{h^2} \left(\frac{3h}{6k+1} + \frac{3a-2h}{2(k+2)} \right)$$

$$M_C = -\frac{Fmka}{h^2} \left(\frac{3h}{6k+1} - \frac{3a-2h}{2(k+2)} \right)$$

$$M_D = \frac{Fm}{2h^2(k+2)} [3a(h+b) + a(3b+h)k] - \frac{3Fmak}{h(6k+1)}$$

$$M_{PA} = M_A - aH_A$$

$$M_{PB} = M_B + bH_D$$